

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## **Modelování vlastností EC motoru**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTERS THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

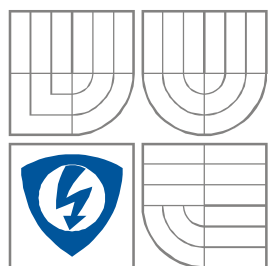
Bc. Pavel Kružík

BRNO 2008



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## **MODELOVÁNÍ VLASTNOSTÍ EC MOTORU**

**PHYSICAL FIELDS MODELLING OF EC MOTOR'S**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTERS THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Pavel Kružík**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Marcel Janda**

**BRNO, 2008**

ZADÁNÍ

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Pavel Kružík

Bytem: Čechtín 45, 675 07

Narozen: 12.2.1984 v Třebíči

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá

elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

☐ disertační práce

☒ diplomová práce

☐ bakalářská práce

☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Modelování vlastností EC stroje

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Marcel Janda

Ústav: Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Datum obhajoby VŠKP: 9.6.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

☒ tištěné formě – počet exemplářů 1

☒ elektronické formě – počet exemplářů 1

---

\* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....

Nabyvatel

.....

Autor

## **Abstrakt**

Součástí této práce je popis konstrukce a funkce elektricky komutovaného stroje. Hlavním cílem je modelování teplotního pole elektricky komutovaného stroje. Pro modelování bylo zvoleno prostředí Ansys Workbench v kombinaci s CAD geometrií. Pro ověření výsledku simulace proběhlo měření jehož výsledky jsou v této práci popsány. Součástí projektu je také porovnání výsledku simulace a hodnot získaných měřením oteplovací charakteristiky elektricky komutovaného stroje.

## **Abstrakt**

This thesis concludes a description of construction and functions of Electronically commutated motors. The main target is modelling of thermal field of Electronically commutated motors. For modelling was chosen Ansys Workbench setting with CAD geometry. There was a measurement for verifying result of simulation, and its proof is described in my thesis. This project also concludes comparison of results from simulation itself and results obtained from measuring thermal profile of EC motor.

**Klíčová slova**

Ansys Workbench; CAD geometrie; EC motor; modelování; simulace; teplotní pole

**Keywords**

Ansys Workbench; CAD geometry; EC motor; field of temperature; modelling; simulation

## **Bibliografická citace**

KRUŽÍK, P. *Modelování vlastností EC motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Modelování vlastností EC motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

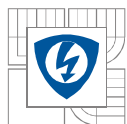
Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcelu Jandovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

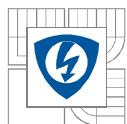
V Brně dne .....

Podpis autora .....

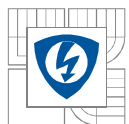


## OBSAH

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>16</b>
<b>2 EC MOTORY .....</b>	<b>17</b>
2.1 OBECNĚ .....	17
2.2 STATOR.....	18
2.3 ROTOR.....	18
2.3.1 PERMANENTNÍ MAGNETY .....	19
2.4 OTÁČKOVÁ ZPĚTNÁ VAZBA .....	22
2.5 ELEKTRONICKÁ KOMUTACE .....	22
2.6 ZJIŠTĚNÍ OKAMŽITÉ POLOHY ROTORU (OKAMŽITÝ ÚHEL NATOČENÍ) .....	22
<b>3 SEZNÁMENÍ S PROGRAMEM ANSYS WORKBENCH .....</b>	<b>24</b>
3.1 ZÁKLADNÍ MYŠLENKY WORKBENCHE.....	24
3.2 TRANSPORT GEOMETRIE Z CAD SYSTÉMU .....	25
3.2.1 CAD ASOCIATIVITA A BI-DIRECTIONAL ASOCIATIVITA .....	25
3.2.2 TRANSPORT GEOMETRIE.....	25
3.2.3 OKOLÍ VYŠETŘOVANÉHO TĚLESA .....	27
3.3 NASTAVENÍ PARAMETRŮ V PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH.....	28
3.3.1 GEOMETRIE .....	28
3.3.2 CONNECTIONS .....	28
3.3.3 MESH.....	28
3.3.4 ANALÝZA .....	29
3.3.5 POČÁTEČNÍ PODMÍNKY.....	29
3.3.6 ZDROJE TEPLA .....	30
3.3.7 VZNIK TEPLA .....	30
3.4 VÝSLEDKY SIMULACE .....	31
<b>4 VYTVOŘENÍ TEPELNÉHO MODELU STROJE V PROGRAMU WORKBENCH.....</b>	<b>32</b>
4.1 GEOMETRIE .....	32
4.1.1 HŘÍDEL .....	32
4.1.2 ROTOROVÉ JHA.....	33
4.1.3 PERMANENTNÍ MAGNETY .....	33
4.1.4 STATOROVÝ SVAZEK.....	34
4.1.5 VINUTÍ.....	34
4.1.6 LOŽISKA .....	35
4.1.7 KOSTRA STROJE.....	35
4.1.8 LOŽISKOVÝ ŠTÍT.....	35
4.1.9 SESTAVA.....	36
4.2 TEPLOTNÍ ANALÝZA V PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH .....	38
4.2.1 OBALENÍ SESTAVY VZDUCHEM .....	38
4.2.2 MESHOVÁNÍ .....	39
4.2.3 ZÁVISLOST MESHE NA VÝSLEDKU SIMULACE .....	44
4.2.4 VLASTNOSTI EC STROJE.....	47
4.2.5 TYP POUŽITÉ ANALÝZY .....	49

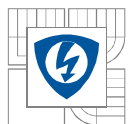


<b>4.3 VÝSLEDKY SIMULACE V PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH .....</b>	<b>49</b>
<b>5 MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO POLE EC STROJE .....</b>	<b>51</b>
<b>5.1 POUŽITÉ ČIDLO PRO MĚŘENÍ TEPLoty .....</b>	<b>51</b>
<b>5.2 PŘICHYCENÍ A UMÍSTĚNÍ ČIDEL .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY .....</b>	<b>52</b>
<b>6 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT .....</b>	<b>55</b>
<b>7 ZÁVĚR .....</b>	<b>57</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>58</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>59</b>

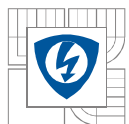


## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>obr. 2.1 Typická konstrukce válcového EC motoru a ložení válcového EC motoru</i>	17
<i>obr. 2.2 Stejnoseměrný motor se samonosným vinutím a klasický stejnosměrný motor</i>	17
<i>obr. 2.3 Snímač polohy elektronicky komutovaného motoru s Hallovou sondou</i>	18
<i>obr. 2.4 Konstrukce rotorů s magnety na povrchu (a) a vestavěnými (b)</i>	19
<i>obr. 2.5 Řez EC motorem</i>	19
<i>obr. 2.6 Typické demagnetizační charakteristiky (2. kvadrant hystereze smyčky) zástupců jednotlivých skupin permanentních magnetů</i>	19
<i>obr. 2.7 Teplotní závislost magnetizace <math>T_c</math></i>	20
<i>obr. 2.8 Doménové uspořádání feromagnetika při absenci vnějšího magnetického pole</i>	21
<i>obr. 2.9 Výsledek simulace pro perm. magnety - SmCo</i>	21
<i>obr. 2.10 Výsledek simulace pro perm. magnety – NdFeB</i>	21
<i>obr. 2.11 Princip bezkartáčového elektronicky komutovaného tachodynamu</i>	22
<i>obr. 2.12 EC motor a) řez motorem b) tvar indukce ve vzduchové mezeře c) tvar proudů v závislosti na poloze rotoru d) schéma vinutí statoru</i>	23
<i>obr. 2.13 Magnetický snímač s Hallovým efektem</i>	23
<i>obr. 2.14 Optický inkrementální snímač</i>	23
<i>obr. 3.1 Úvodní stránka programu Ansys Workbench</i>	25
<i>obr. 3.2 Příklad návrhu v CAD systému a geometrie v programu Workbench</i>	25
<i>obr. 3.3 Meshování</i>	29
<i>obr. 3.4 Zdroje tepla</i>	30
<i>obr. 3.5 Oteplení vodiče</i>	30
<i>obr. 3.6 Grafické výstupy</i>	31
<i>obr. 4.1 Náčrtek hřídele elektronicky komutovaného stroje</i>	32
<i>obr. 4.2 Zjednodušený model hřídele elektricky komutovaného stroje</i>	33
<i>obr. 4.3 Náčrtek rotorového jha stroje a zjednodušený model</i>	33
<i>obr. 4.4 Náčrtek permanentních magnetů stroje a jeho model</i>	34
<i>obr. 4.5 Náčrtek statorového obvodu stroje a zjednodušený model</i>	34
<i>obr. 4.6 Zjednodušený model vinutí EC motoru</i>	35
<i>obr. 4.7 Model ložiska a zjednodušený model ložiska</i>	35
<i>obr. 4.8 Náčrtek kostry stroje a zjednodušený model kostry</i>	36
<i>obr. 4.9 Náčrtek ložiskového štítu a jeho model</i>	36

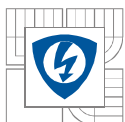


<i>obr. 4.10 Rotorová část sestavy použitá pro výpočet.....</i>	<i>37</i>
<i>obr. 4.11 Sestava použitá pro výpočet bez kostry a lož. štítů .....</i>	<i>37</i>
<i>obr. 4.12 Výsledná sestava použitá pro výpočet teplotních vlastností EC stroje .....</i>	<i>38</i>
<i>obr. 4.13 Obalení tělesa vzduchem.....</i>	<i>38</i>
<i>obr. 4.14 Automatický mesh – hřídel, rotorové jho, ložiska a perm. magnety .....</i>	<i>39</i>
<i>obr. 4.15 Úprava meshe – hřídel, rotorové jho, ložiska a perm. magnety .....</i>	<i>40</i>
<i>obr. 4.16 Automatický mesh – statorové plechy a vinutí.....</i>	<i>42</i>
<i>obr. 4.17 Úprava meshe – statorové plechy a vinutí.....</i>	<i>42</i>
<i>obr. 4.18 Automatický mesh – kostra a ložiskové štíty .....</i>	<i>43</i>
<i>obr. 4.19 Úprava meshe – kostra a ložiskové štíty .....</i>	<i>44</i>
<i>obr. 4.20 Výsledek simulace při automatickém meshi a při meshi upraveném .....</i>	<i>45</i>
<i>obr. 4.21 Výsledek simulace hřídele při automatickém meshi.....</i>	<i>45</i>
<i>obr. 4.22 Výsledek simulace hřídele při upraveném meshi.....</i>	<i>46</i>
<i>obr. 4.23 Porovnání teplot v různých bodech hřídele pro různou kvalitu meshe .....</i>	<i>46</i>
<i>obr. 4.24 Maximální dosažené teploty pro různou hustotu meshe .....</i>	<i>46</i>
<i>obr. 4.25 Vypočítaný průběh oteplovací charakteristiky.....</i>	<i>50</i>
<i>obr. 5.1 Tvar pouzdra termistoru KTY10D-M.....</i>	<i>51</i>
<i>obr. 5.2 Závislost odporu termistoru na teplotě.....</i>	<i>51</i>
<i>obr. 5.3 Umístění teplotního čidla.....</i>	<i>52</i>
<i>obr. 5.4 Oteplovací charakteristika EC motoru.....</i>	<i>54</i>
<i>obr. 5.5 Průběh naměřených hodnot teploty při chvění stroje.....</i>	<i>54</i>
<i>obr. 6.1 Porovnání naměřených a vypočtených průběhů .....</i>	<i>56</i>



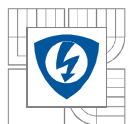
## SEZNAM TABULEK

<i>tab. 1 Curieovy teploty některých feromagnetik .....</i>	<i>20</i>
<i>tab. 2 Počty elementů a nodů při meshování hřídele .....</i>	<i>39</i>
<i>tab. 3 Počty elementů a nodů při meshování hřídele .....</i>	<i>40</i>
<i>tab. 4 Počty elementů a nodů při meshování rotorového jha .....</i>	<i>41</i>
<i>tab. 5 Počty elementů a nodů při meshování permanentních magnetů .....</i>	<i>41</i>
<i>tab. 6 Počty elementů a nodů při meshování statorového vinutí .....</i>	<i>41</i>
<i>tab. 7 Počty elementů a nodů při meshování statorových plechů .....</i>	<i>42</i>
<i>tab. 8 Počty elementů a nodů při meshování ložiskového štítu .....</i>	<i>43</i>
<i>tab. 9 Počty elementů a nodů při meshování kostry motoru .....</i>	<i>43</i>
<i>tab. 10 Přehled maximálních teplot při různé hustotě sítě elementů pro různé časové okamžiky .....</i>	<i>47</i>
<i>tab. 11 Obecné vlastnosti EC stroje .....</i>	<i>47</i>
<i>tab. 12 Ztráty ve statoru .....</i>	<i>48</i>
<i>tab. 13 Vlastnosti statorového jha stroje a ztrátový výkon .....</i>	<i>48</i>
<i>tab. 14 Vlastnosti vinutí stroje a ztrátový výkon .....</i>	<i>48</i>
<i>tab. 15 Vlastnosti ložiska stroje a ztrátový výkon .....</i>	<i>48</i>
<i>tab. 16 Vypočítané hodnoty oteplovací charakteristiky v prostředí Ansys Workbench .....</i>	<i>49</i>
<i>tab. 17 Vlastnosti termistoru KTY10D-M .....</i>	<i>51</i>
<i>tab. 18 Parametry měření .....</i>	<i>52</i>
<i>tab. 19 Naměřené hodnoty .....</i>	<i>53</i>
<i>tab. 20 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot .....</i>	<i>55</i>



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol / zkratka	Jednotka	Název
Co	[ - ]	Kobalt
EC motor	[ - ]	Elektricky komutovaný motor
Fe	[ - ]	Železo
$f_{\max}$	[Hz]	Frekvence napájecího napětí
Gd	[ - ]	Gadolinium
$l$	[m]	Délka rotoru
$l_{dp}$	[m]	Mezera mezi magnety
$m$	[kg]	Hmotnost
$M$	[Nm]	Jmenovitý moment
$M_z$	[Nm]	Zátěžný moment
$n$	$[\text{min}^{-1}]$	Jmenovité otáčky
NdFeB	[ - ]	Neodym-železo-bor
Ni	[ - ]	Nikl
$P_{cu}$	[W]	Ztráty v mědi
$P_{hSjho}$	[W]	Hysterezi ztráty v jha statoru
$P_{hz}$	[W]	Hysterezi ztráty v zubech statoru
PM	[ - ]	Permanentní magnet
$P_{mech}$	[W]	Mechanické ztráty
$P_{scelk}$	[W]	Celkové ztráty statoru
$P_{VSjho}$	[W]	Vířivé ztráty v jha statoru
$P_{vz}$	[W]	Vířivé ztráty v zubech statoru
$P_{zcelk}$	[W]	Celkové ztráty stroje
$Q$	[ - ]	Celkový počet drážek rotoru
$q$	[ - ]	Počet drážek na pól a fázi
$R$	$[\Omega]$	Odpor
$r_{rot}$	[m]	Poloměr rotoru
$\text{SmCO}_5$	[ - ]	Samariun-kobalt
$t$	[s]	Čas
$T$	$^{\circ}\text{C}$	Teplota
$T_0$	$^{\circ}\text{C}$	Počáteční teplota
$U_d$	[V]	Napájecí napětí
$V$	$[\text{m}^3]$	Objem
$\phi$	[Wb]	Magnetický tok



# 1 ÚVOD

Jedním z cílů této práce je základní seznámení s principem elektronicky komutovaného motoru. Elektronicky komutovaný (EC) motor je v podstatě "obrácený" stejnosměrný motor, někdy se nazývá také bezkomutátorovým stejnosměrným motorem. Zatímco klasický stejnosměrný motor má magnety ve statoru a vinutí na rotoru, elektronicky komutovaný motor má magnety na rotoru a vinutí na statoru. Pro komutaci statorového stejnosměrného proudu do následujícího fázového vinutí potřebujeme snímat polohu rotoru, a to diskrétně vždy po 60 el. stupních. Součástí motoru (statoru) je tedy snímač polohy rotoru, nejčastěji magnetický nebo fotoelektrický. Princip elektrické komutace je v práci podrobně popsán, stejně jako princip funkce EC motorů a jejich konstrukce.

Programy firmy ANSYS Inc. patří do skupiny nejznámějších softwarových prostředků pro výpočty. Je postaven na logickém cadovsky orientovaném menu, podporující účinné algoritmy výpočtu nad geometrií CAD modelu. Prostředí Ansys Workbench umožňuje oproti klasickému postupu výpočtu zcela odlišný a přitom vysoce efektivní způsob práce. Ansys Workbench je speciální software, který umožňuje řešení nejrůznějších problematik. Pro potřeby této práce byly využity možnosti tepelné simulace. Práce obsahuje popis tvorby geometrie v prostředí Autodesk Inventor Profesional 2008 a její zjednodušení s následným exportem do prostředí Ansys Workbench. Nastavení jednotlivých parametrů před spuštěním simulace má zásadní vliv na výsledek. V práci jsou popsány nejdůležitější úpravy a kroky, které je nutno podniknout pro získání správných výsledků. Patří sem například meshování, tvorba vazeb, nastavení ztrátových výkonů, nastavení okolních a počátečních podmínek a další.

Další bod, kterým se tato práce zabývá je ověření vypočtených hodnot měřením EC motoru. Měření proběhlo pomocí termistoru připevněného na kostře statoru. Přesný typ termistoru a způsob uchycení je také popsán v práci. Měření bylo doplněno snímáním obrázků pomocí termokamery.

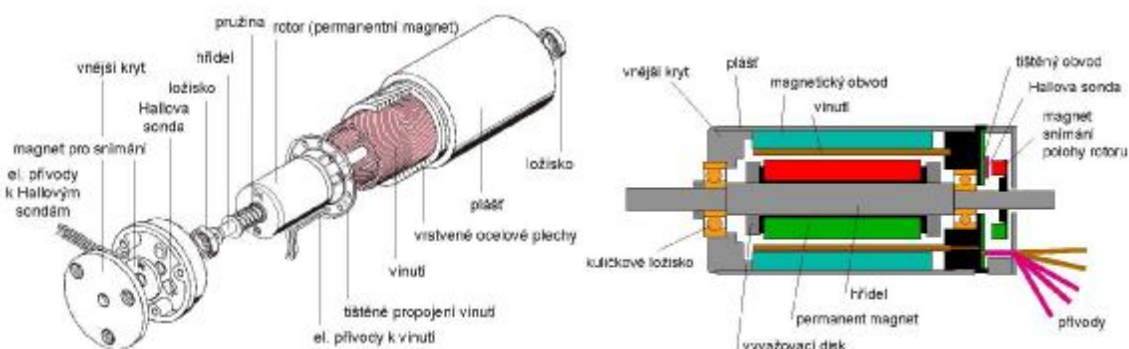
V posledním bodě je provedeno porovnání vypočtených a naměřených oteplovacích charakteristik elektricky komutovaného stroje. Průměrná odchylka vypočítané a naměřené oteplovací charakteristiky jsou pouhá 4%, což vypovídá o velmi slušném výsledku simulace.



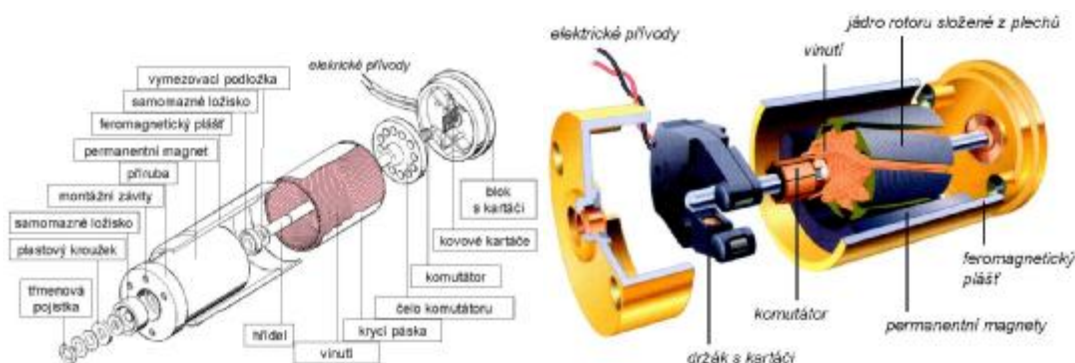
## 2 EC MOTORY

### 2.1 Obecně

Stejnosemřný motor je výhodný pro nejrůznější aplikace včetně různých servomechanizmů. Lze u něj snadno řídit rychlost a napětí kotvy. Má však i nevýhody, plynoucí z použití kluzného kontaktu mezi komutátorem a sběracími kartáči. Sběrací ústrojí (komutátor a kartáče) vyžaduje pravidelnou údržbu (čištění komutátoru, výměnu a zabrušování kartáčů). Při vyšších otáčkách je vyšší napětí mezi jednotlivými lamelami komutátoru, které při větších proudech způsobuje jiskření a pokud by proud nebyl omezen, mohlo by toto jiskření způsobit kruhový oblouk na komutátoru. Kvůli těmto nevýhodám došlo k vývoji nového typu motorů. Elektronicky komutovaný motor je v podstatě "obrácený" stejnosměrný motor, někdy se nazývá bezkomutátorovým stejnosměrným motorem (obr. 2.1). EC motory jsou několikanásobně přetížitelné, mají velký záběrný moment, nízkou časovou konstantu a malé rozměry. Životnost EC motoru je oproti klasickému stejnosměrnému motoru několikanásobně delší a rychlost EC motorů není omežována mechanickou komutací, ale pouze odstředivou silou na rotoru (při příliš velké rychlosti může dojít k mechanickému poškození stroje). Zatímco klasický stejnosměrný motor (obr. 2.2) má magnety ve statoru a vinutí na rotoru, elektronicky komutovaný motor má magnety na rotoru a vinutí na statoru.



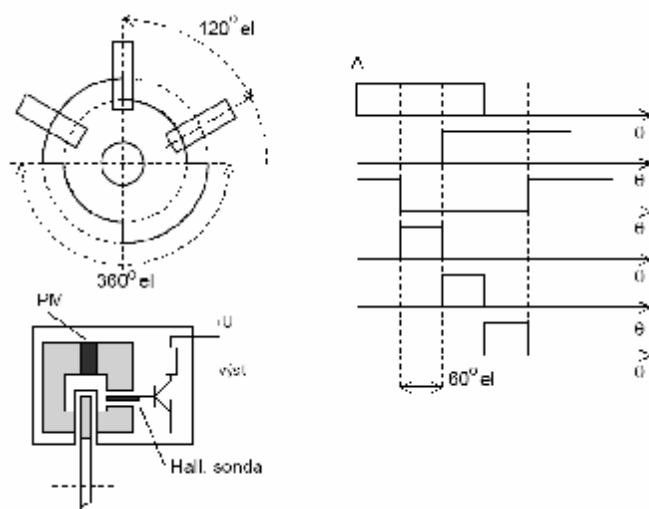
obr. 2.1 Typická konstrukce válcového EC motoru a ložení válcového EC motoru



obr. 2.2 Stejnosemřný motor se samonosným vinutím a klasický stejnosměrný motor

## 2.2 Stator

Elektronicky komutovaný motor se skládá ze statoru, který se podobá standardnímu statoru třífázového asynchronního nebo synchronního stroje. V listěném statoru je v drážkách uloženo třífázové vinutí zapojené do hvězdy, nebo do trojúhelníku. Z principu funkce elektronicky komutovaného motoru je zřejmé, že pro komutaci statorového stejnosměrného proudu do následujícího fázového vinutí potřebujeme snímat polohu rotoru, a to diskrétně vždy po 60 el. stupních. Součástí motoru (statoru) je tedy snímač polohy rotoru, nejčastěji magnetický nebo fotoelektrický. Princip magnetického snímače polohy rotoru s Hallovými sondami pro čtyřpólový stroj je nakreslen na obr. 2.3, na němž jsou i průběhy tří výstupních signálů, jejichž dalším zpracováním v logických obvodech dostaneme povely pro komutaci proudu pro tři statorová vinutí.

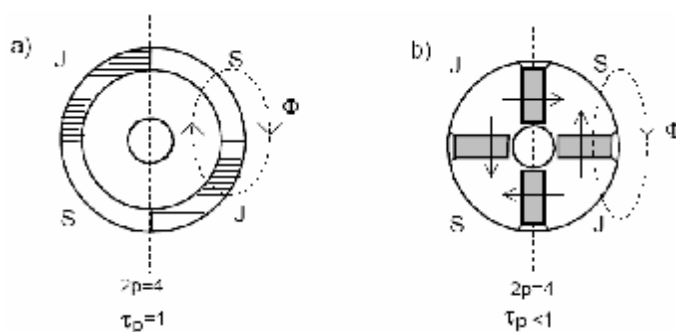


obr. 2.3 Snímač polohy elektronicky komutovaného motoru s Hallovou sondou

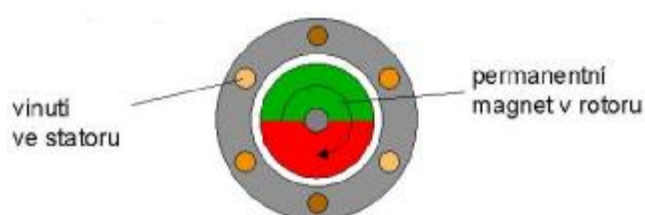
## 2.3 Rotor

Rotor bývá konstrukčně uspořádán s magnety na povrchu, kdy nedochází ke koncentraci magnetického toku a magnetická indukce v mezeře odpovídá indukci permanentních magnetů, nebo s magnety vestavěnými uvnitř rotoru s koncentrací magnetického toku pólovými mi nástavci. Oba konstrukční principy umístění magnetů jsou patrné na obr. 2.4.

Jako magnetických materiálů se používá vzácných zemin (samarium-kobalt, neodym-železo-bor) nebo levnějších tvrdých feritů (Durox a podobně), které však nemají tak dobré magnetické vlastnosti. Kvalita permanentních magnetů se porovnává podle průběhu hysteresní křivky, zejména její takzvané demagnetizační části. Na obr. 2.5 je zobrazen řez EC motorem.



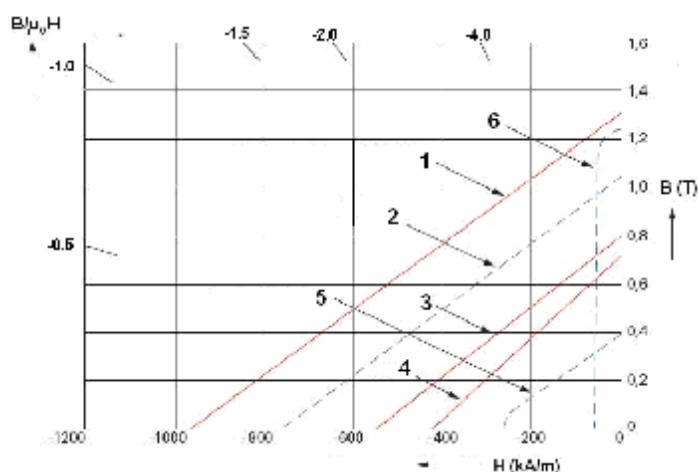
obr. 2.4 Konstrukce rotorů s magnety na povrchu (a) a vestavěnými (b)



obr. 2.5 Řez EC motorem

### 2.3.1 Permanentní magnety

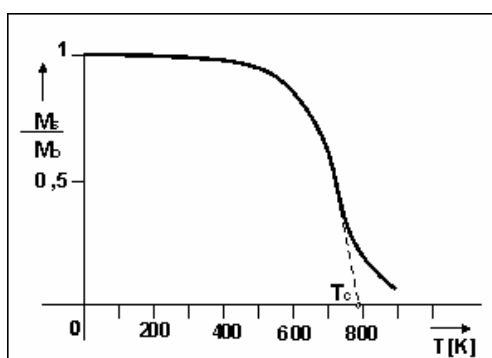
Pro permanentní magnety použité v EC motoru musí být zvolen vhodný typ materiálu. Existují čtyři hlavní skupiny permanentních magnetů (Ferit, Alnico, SCO, NdFeB). Porovnání jejich demagnetizačních charakteristik je uvedeno na obr. 2.6.



obr. 2.6 Typické demagnetizační charakteristiky (2. kvadrant hysterezí smyčky) zástupců jednotlivých skupin permanentních magnetů

Kde na obr. 2.6 je křivka 1–NdFeB (anizotropní spěkaný či plastickou deformací vyrobený z izotropního), křivka 2–Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>, křivka 3–NdFeB (izotropní hutný), křivka 4–NdFeB (pojivý), křivka 5–ferit a křivka 6–Alnico.

Pokud by byl zvolen nevhodný materiál pro permanentní magnety, mohlo by dojít při zahřátí motoru k situaci, kdy teplota na permanentních magnetech dosáhne Curieova bodu. Magnetizace veškerých feromagnetických materiálů se vzrůstající teplotou klesá až k nule, totéž platí i pro trvalé magnety. Teplotní závislost je charakterizována tzv. Curieovou teplotou ( $T_c$ ), která je průsečíkem směrnice sestupné části křivky s teplotní osou (obr. 2.7). Při použití trvalých magnetů je třeba dbát na to, aby se pracovní teplota nepřiblížila  $T_c$ . Bezpečná "vzdálenost" je přibližně do 0,4 násobku  $T_c$ . Pro aplikace, kde pracovní teplota nepřesahuje  $150^\circ\text{C}$  se používají permanentní magnety vyrobené ze slitiny NdFeB. Při přítomnosti vyšších teplot je však nezbytné použití samarium kobaltových permanentních magnetů, které jsou však několikanásobně dražší. Curieovy teploty některých feromagnetik jsou uvedeny v tab. 1

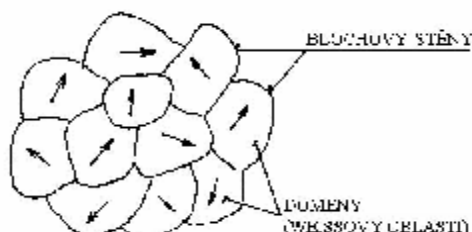


obr. 2.7 Teplotní závislost magnetizace  $T_c$

Feromagnetikum		Curieova teplota	
Chemická značka	Název	[K]	[ $^\circ\text{C}$ ]
Fe	Železo	1043	770
Co	Kobalt	1400	1127
Ni	Nikl	631	358
Gd	Gadolinium	292	19
SmCo5	Samarium-kobalt	1018	745
NdFeB	Neodym-železo-bór	588	315

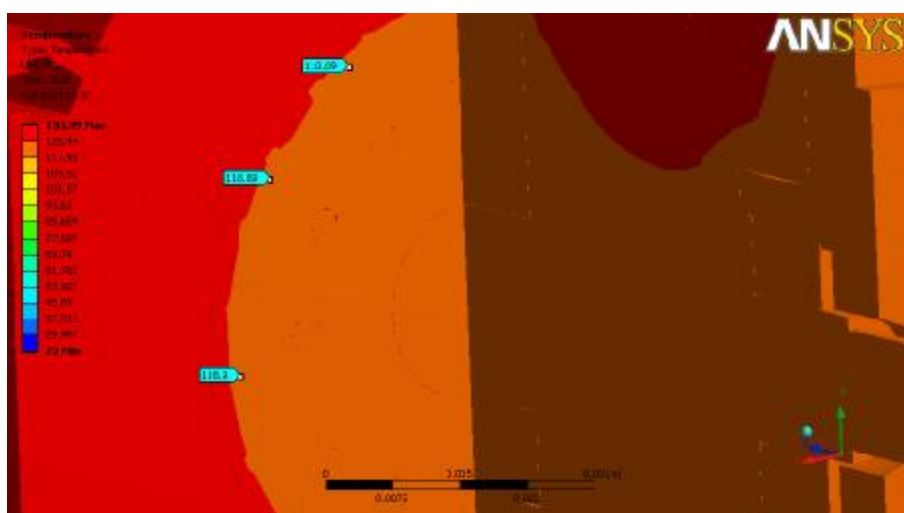
tab. 1 Curieovy teploty některých feromagnetik

Přemagnetování feromagnetických látek se děje změnou objemu domén neboli posunem jejich rozhraní (tzv. Blochových stěn) a otáčením vektory magnetizace domén. Na obr. 2.8 je vykresleno doménové uspořádání feromagnetika při absenci vnějšího magnetického pole.

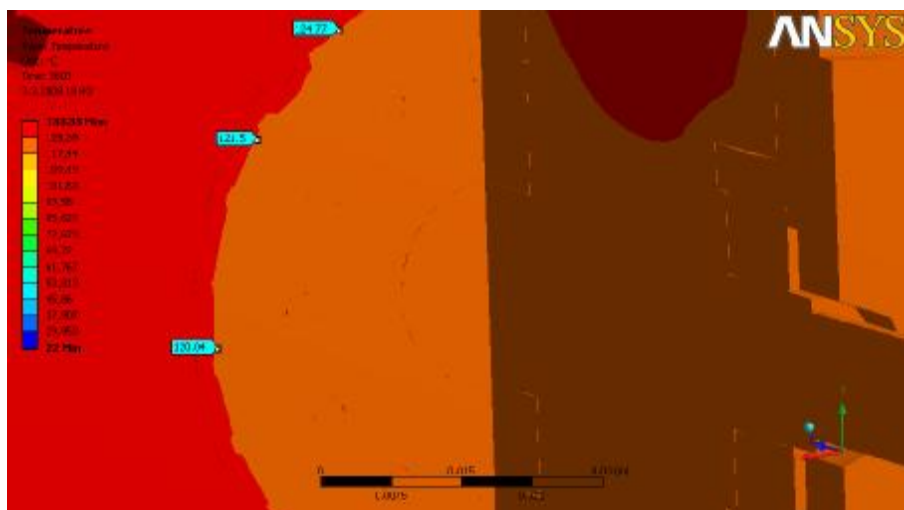


*obr. 2.8 Doménové uspořádání feromagnetika při absenci vnějšího magnetického pole*

Výsledky simulace pro dva nejpoužívanější typy permanentních magnetů jsou na obr. 2.9 a obr. 2.10. Z těchto obrázků je patrné, že změnou typu permanentních magnetů dojde při stejných podmínkách ke změně teploty v oblasti permanentních magnetů až o šest stupňů Celsia.



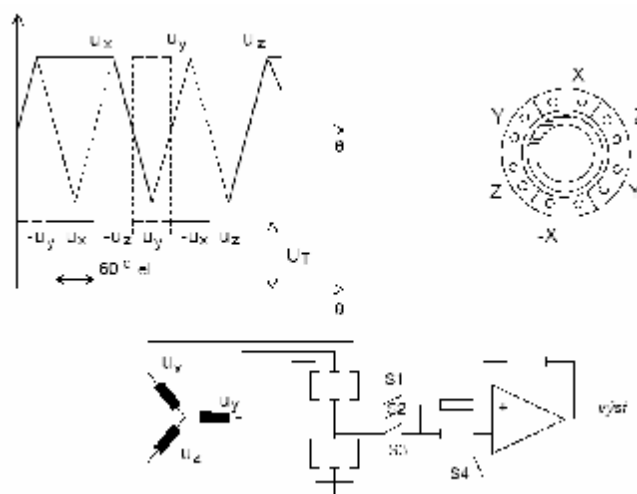
*obr. 2.9 Výsledek simulace pro perm. magnety - SmCo*



*obr. 2.10 Výsledek simulace pro perm. magnety – NdFeB*

## 2.4 Otáčková zpětná vazba

Pro otáčkovou zpětnou vazbu je vestavěno ve stroji bezkartáčové elektronicky komutované tachodynamo. Bezkartáčové tachodynamo je opět elektronicky komutovaný stroj s permanentními magnety na rotoru, orientovanými souhlasně a s dostatečnou přesností s úhlovou polohou magnetů vlastního motoru. Tvar indukovaného napětí tachodynamu a schéma vyhodnocovacího obvodu jsou na obr. 2.11.



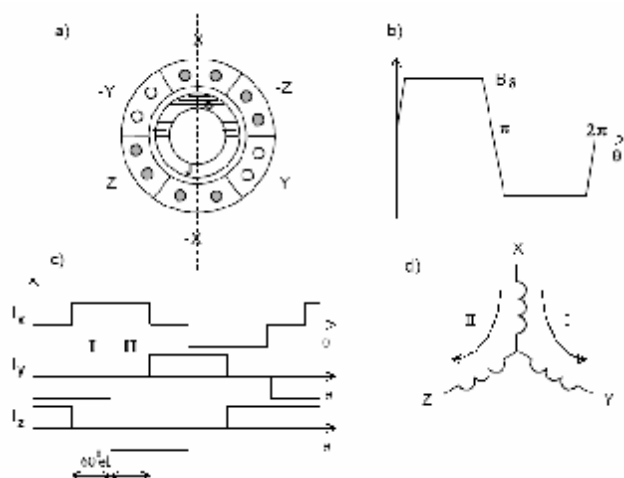
obr. 2.11 Princip bezkartáčového elektronicky komutovaného tachodynamu

## 2.5 Elektronická komutace

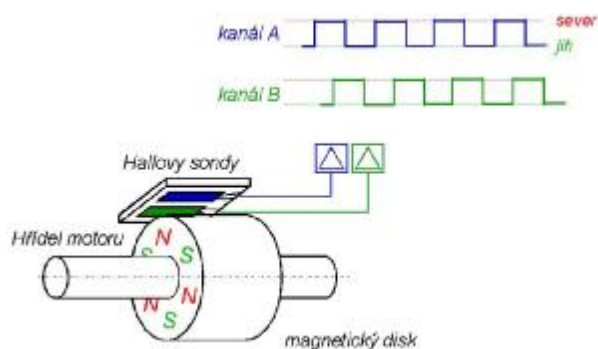
U EC motorů probíhá komutace elektronicky, narozdíl od klasických DC motorů. Magnetické pole, které sleduje polohu kotvy je zde tvořeno proměnnými proudy. Tyto proudy dodává do statorového vinutí řídicí jednotka, která podle polohy rotoru (okamžitý úhel natočení) přepíná proud do jednotlivých statorových vinutí. Princip elektronicky komutovaného motoru je patrný z obr. 2.12. Ke změně napájení vinutí dochází  $30^\circ$  úhlových před a  $30^\circ$  za optimální polohou vzhledem k rotoru. Vzájemné natočení magnetických polí rotoru a statoru se během rotace rotoru mění. V okamžiku, kdy jsou směry magnetických polí kolmé, má motor největší moment.

## 2.6 Zjištění okamžité polohy rotoru (okamžitý úhel natočení)

K přesnému řízení EC motorů je zapotřebí diskrétní zjišťování okamžitého úhlu natočení rotoru. Za tímto účelem jsou v motoru zabudovány tři Hallovy sondy (obr. 2.13) vzájemně posunuté o  $120^\circ$  stupňů elektrických.

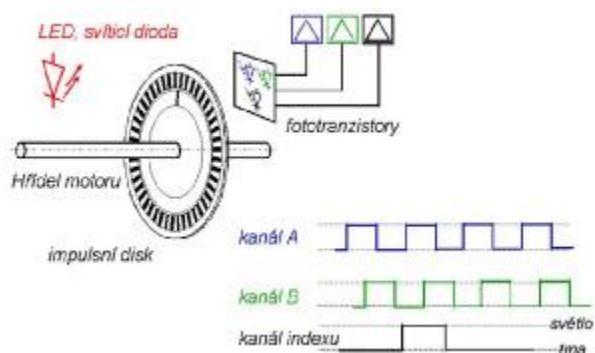


obr. 2.12 EC motor a) řez motorem b) tvar indukce ve vzduchové mezeře c) tvar proudů v závislosti na poloze rotoru d) schéma vinutí statoru



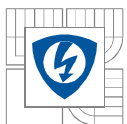
obr. 2.13 Magnetický snímač s Hallovým efektem

V aplikacích, kde je zapotřebí vyšší přesnost regulace se používá kombinace tří Hallových sond a inkrementálního snímače (obr. 2.14). Pohybující se permanentní magnety na rotoru budí impulsy v Hallových sondách. Řídící jednotka EC motoru tak mění proudy (a tím magnetické pole statoru) tekoucí do jednotlivých fází statorového vinutí tak, aby byl udržován optimální úhel vzhledem k rotoru.



obr. 2.14 Optický inkrementální snímač





### 3 SEZNÁMENÍ S PROGRAMEM ANSYS WORKBENCH

Programy firmy ANSYS patří do skupiny nejznámějších softwarových prostředků pro výpočty metodou konečných prvků. ANSYS Workbench byl poprvé představen ve verzi Rev.7.0, a sice jako prostředí pro program ANSYS DesignSpace, který je určen pro výpočty podporující práci konstruktérů. Workbench postavený na logickém, cadovsky orientovaném menu podporujícím účinné algoritmy výpočtu nad geometrií CAD modelu, představoval nový, od klasického postupu výpočtu zcela odlišný a přitom vysoce efektivní způsob práce. Vývoj Workbenche byl nasměrován na integraci programů ANSYS Base series, které jsou určeny pro výpočtáře specialisty.

Ansys Workbench je označován jako vývojové prostředí, které umožňuje rychlou a efektivní práci současným sdílením libovolných CAD systémů a skupiny FEM softwaru, který je integrovatelný do prostředí ANSYS Workbench.

Program Ansys Workbench je speciální software, který umožňuje řešení nejrůznějších problematik. Umožňuje například řešení dynamiky tuhých těles, tvarovou optimalizaci, teplotní simulace a mnoho dalších problematik. Jedním z úkolů této práce je seznámení se základy tepelné simulace.

#### 3.1 Základní myšlenky Workbenche

Filozofii Workbenche lze shrnout do následujících bodů:

- integrace různých fyzikálních analýz a systémů do jednoho multifyzikálního výpočtu
- výpočet přímo na geometrii CAD modelu;
- radikální zkrácení času aplikací technologie Workbench;

Workbench je určen pro konstruktéry, vývojáře a další uživatele FEM, přičemž umožňuje provádět požadované analýzy vysoce efektivně. Intuitivní jednoduché prostředí plus ovládací menu umožňují zkrátit přípravu modelu. Workbench lze spustit přímo z menu CAD systému, čímž je automaticky importována geometrie. Nepoužívá se žádná transformace, síť pro výpočet je generována velmi robustním generátorem přímo na původní geometrii. V místech vzájemného styku součástí je automaticky vygenerován kontakt. Parametricky definované veličiny geometrie jsou automaticky použitelné jako parametry pro výpočet v ANSYS, takže pokud dojde výpočtem ke změně geometrie, mění se přímo geometrie CAD modelu. Při úpravách geometrie na CAD modelu zůstávají zachovány okrajové podmínky a zatížení.



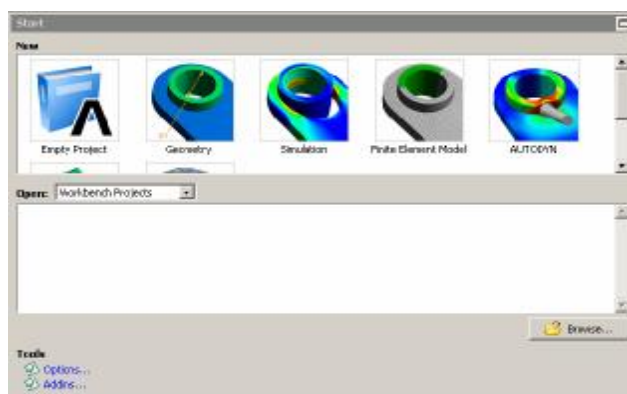
## 3.2 Transport geometrie z CAD systému

### 3.2.1 CAD asociativita a Bi-Directional asociativita

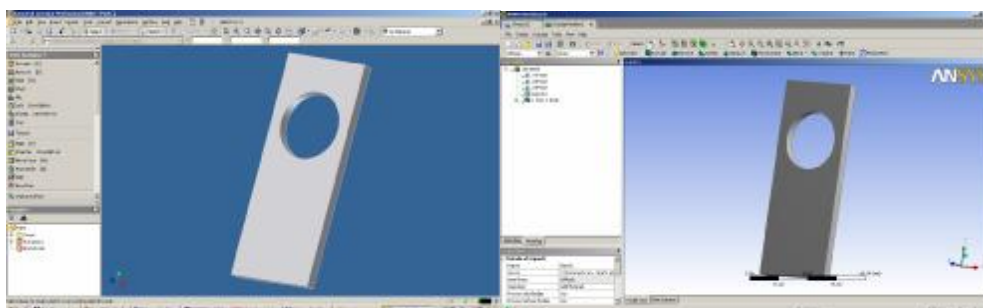
Ansys Workbench využívá „Plug-In“ architekturu, která zachovává asociativitu s geometrií CAD systému, ať už se jedná o modely na úrovni objemů, nebo modely vytvořené z ploch, při změně geometrie CAD modelu zůstává zachována již jednou definovaná obecná okrajová podmínka (zatížení a okrajové podmínky) a jejich zadávání už není potřebné znovu opakovat. Jestliže je v následném optimalizačním výpočtu změněn některý z parametricky definovaných rozměrů modelu, provede Workbench Environment parameter manager automaticky změnu na CAD geometrii.

### 3.2.2 Transport geometrie

Transport geometrie z CAD systému do prostředí Ansys Workbench je poměrně jednoduchá záležitost. Nejprve musíme být vytvořený libovolný objekt v CAD systému. Pro tuto práci byl použit jako CAD systém program Autodesk Inventor Professional 2008. Příklad návrhu je zobrazen na obr. 3.2.



obr. 3.1 Úvodní stránka programu Ansys Workbench



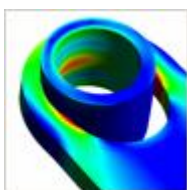
obr. 3.2 Příklad návrhu v CAD systému a geometrie v programu Workbench

Po otevření programu Ansys Workbench můžeme vidět úvodní stránku (obr. 3.1), na které si uživatel vybere modul, ve kterém chce pracovat.

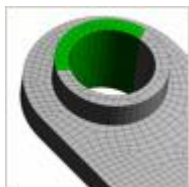
### Program Ansys Workbench nabízí tyto moduly:



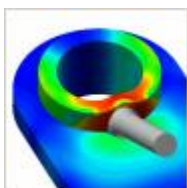
- **Empty Project**
  - otevře nový projekt
  - řízení dat v jednotném prostředí
  - předávání informací a parametrů mezi jednotlivými moduly
  - sdílení dat v otevřené architektuře



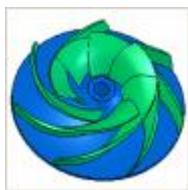
- **Simulation**
  - ANSYS integrovaný do prostředí Workbench
  - zadávání zatížení, vazeb, tabulkami, grafy
  - řešení úloh (strukturálních, teplotních, nelineárních, modálních, dynamických, tvarové optimalizace, a další)



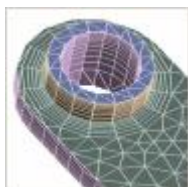
- **Finite Element Modeler**
  - načítání a export do ANSYS, Nastran, ABAQUS formátů (0D, 1D, 2D, 3D, kontakty, kompozity, materiály, tloušťky 2D elementů, souřadné systémy, vazební rovnice, vazby, zatížení
  - transformace mřížky a vyhodnocení kvality elementů



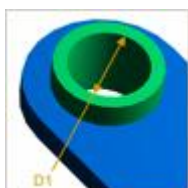
- **Autodyn**
  - explicitní řešič (FEM, CFD, SPH, shell, beam, ...)
  - možná libovolná kombinace jednotlivých řešičů mezi sebou
  - vlastní materiálová knihovna
  - interaktivní uživatelské rozhraní



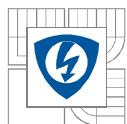
- **BladeModeler**
  - CAD modelář pro 1-D až 3-D návrh lopatkových strojů
  - integrovaný s modulem DesignModeler



- **Meshing**
  - automatizovaný generátor mřížky
  - FEM, CFD, ELMG, explicit
  - tetra, prism, sweep, hexa dominant mřížka



- **Geometry**
  - umožňuje import 3D geometrie z CAD systému
  - 3D CAD modelář na jádře Parasolid®
  - úprava geometrie podle potřeb jednotlivých analýz



Pro import CAD geometrie do programu Ansys Workbench je tedy nutné zvolit poslední uvedený modul a to „Geometry“. Následuje výběr požadované délkové jednotky. Program nabízí výběr ze šesti možností. Jsou to metr, centimetr, milimetr, micrometr, inch (palec) a foot (stopa). Podmínkou správného převodu je volba totožné délkové jednotky v jaké byl sestaven prvek v CAD geometrii.

K samotnému importu CAD geometrie nyní již stačí v hlavním menu zvolit položku File a v rozbalovacím menu možnost „Import External Geometry File ...“. Výsledek importu CAD geometrie do programu Ansys Workbench je na obr. 3.2. Mezi problémy, které mohou nastat při importu geometrie z CAD systému patří například tzv. rozpad geometrie (především u složitějších soustav). V této práci jsem se však z žádným problémem při importu geometrie nesetkal.

#### **Mezi podporované CAD systémy patří:**

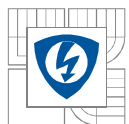
- Pro/Engineer
- Unigraphics
- Catia
- SolidWorks
- Solid Edge
- Inventor/MDT
- standardní formáty IGES, Parasolid, SAT (ACIS).

#### **Workbench podporuje tyto výpočetní programy:**

- ANSYS/Structural, /Mechanical
- ANSYS/Professional, DesignSpace, DesignXplorer, Fatigue, Paramesh,
- ICEM CFD/Tetra Prism, /Hexa, ICEM/CFX
- CFX Base.

### **3.2.3 Okolí vyšetřovaného tělesa**

Pro přesnější výpočet je nutno vyšetřované těleso, nebo sestavu co nejvíce přiblížit skutečnosti. Při výpočtech má na sestavu značný vliv okolní teplota vzduchu. Z tohoto důvodu se provádí obalení sestavy vzduchem. Prostředí Ansys Workbench nabízí několik možných tvarů, kterými můžeme těleso obalit. Patří sem krychle, koule, válec a vlastní tvar. Je vhodné vybrat takový tvar obalení vzduchu, aby nebyl zbytečně počítán příliš velký objem vzduchu ve velké vzdálenosti od vyšetřovaného objektu. V nastavení obalení tělesa vzduchem můžeme také nastavit nejmenší vzdálenost okraje obalení od každého bodu vyšetřovaného tělesa.



### 3.3 Nastavení parametrů v prostředí Ansys Workbench

#### 3.3.1 Geometrie

V záložce Geometry je možné pro každou importovanou součást upravit její vlastnosti. Menu Geometry je rozděleno do několika oblastí. První je Graphics Properties. Zde je možné nastavit viditelnost součástky, průhlednost a barvu součástky. Druhá oblast je nazvaná Definition a umožňuje zvolit například materiál, ze kterého je součást vyrobena. Další oblast je nazvaná Properties. Umožňuje v závislosti na zvoleném materiálu zjistit hmotnost součástí. Je zde uveden také objem součástí (objem součástí je potřebný pro zadání ztrátového výkonu). Poslední oblastí je Statistics. Zde jsou uvedeny informace týkající se meshování. Můžeme zjistit na kolik elementárních částíček byla součást rozdělena a kolik obsahuje nodů.

#### 3.3.2 Connections

Definuje podmínky v místě, kde se setkávají dvě, nebo více součástí. Program Ansys Workbench umožňuje více druhů spojení. Patří sem například Spot Weld (bodové svařování), Joints (kloubový spoj), Spring (pružný spoj). Výhodou programu Ansys Workbench je jeho schopnost rozpoznání a automatického vygenerování místa vzájemného styku součástek. U automatické generace kontaktu může nastat problém v případě, kdy se jednotlivé součásti protínají. V průběhu tvorby této práce jsem se s žádným problémem ohledně tvorby kontaktů nesetkal.

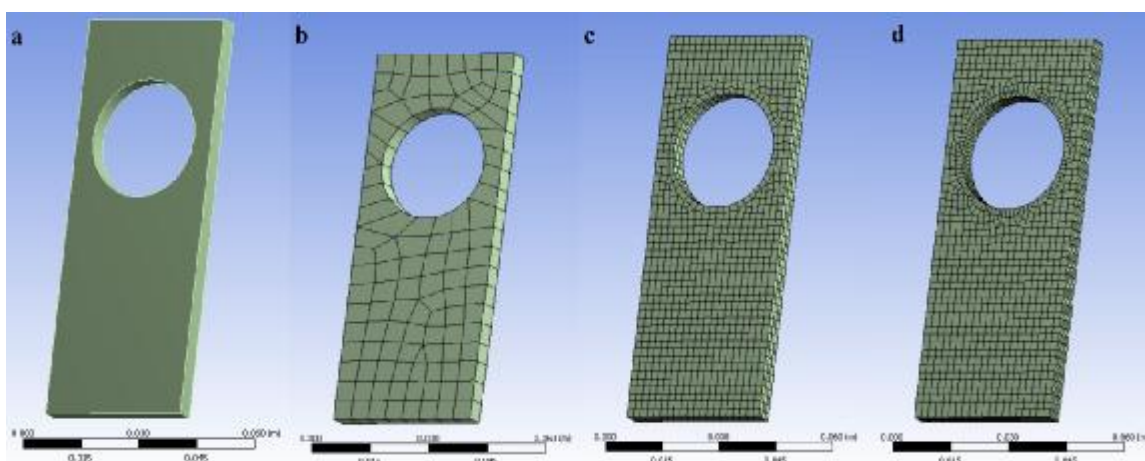
#### 3.3.3 Mesh

Meshování je jeden z nejdůležitějších procesů před výpočtem a má zásadní vliv na přesnost výpočtu. Je proto nutné zvolit vhodnou velikost elementů a vhodnou metodu meshování. Program Ansys Workbench umožňuje automatické meshování. Pokud uživatel této možnosti využije, program vytvoří síť elementů o určité hustotě. Pro optimální řešení je však nutno v určitých oblastech síť z hustit a v jiných případně naopak zjemnit. Zhušťování sítě probíhá pro větší přesnost výpočtu a provádí se v oblastech, které jsou pro uživatele „zajímavější“. Takovou oblastí může být například přechod mezi dvěma, nebo více tělesy z různých materiálů a další. Přílišná hustota sítě však zvyšuje nároky na hardwarové vybavení počítače a může rapidně prodloužit dobu výpočtu. Z tohoto důvodu se v oblastech, které jsou pro uživatele méně zajímavé, nebo v oblastech, kde není požadována příliš velká přesnost výpočtu volíme menší hustotu sítě. Tím dochází ke zmenšení celkového počtu elementů a ke zkrácení doby výpočtu.

Další vlastnost, která má vliv na přesnost výpočtu je výběr druhu elementu, který bude použit pro meshování. Workbench nabízí tyto druhy elementů, Tetrahedrons, Hex Dominant, Sweep, CFX Mesh. V této práci však bude využito pouze možnosti automatického meshování a úpravy velikosti elementů.

### Ukázka meshování

Na obr. 3.3 a, můžeme vidět objekt před meshováním. Pomoci Generate Mesh proběhlo automatické meshování. Výsledná soustava elementů je na obr. 3.3 b,. Pro větší přesnost provedeme zhuštění sítě elementů. Zhuštěná síť je vyobrazena na obr. 3.3 c,. Předpokládejme například, že nás více zajímá přechod tepla v okolí otvoru v destičce. Z tohoto důvodu ještě více zjemníme síť v jejím okolí, tak jak je to na obr. 3.3 d,.



obr. 3.3 Meshování

### 3.3.4 Analýza

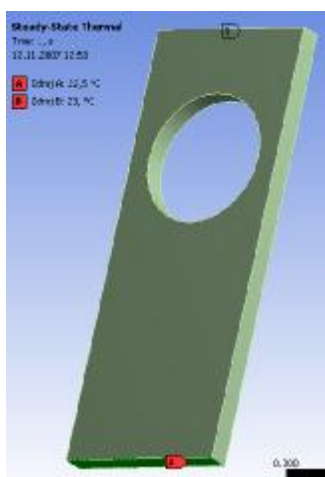
Dalším krokem v simulaci je výběr analýzy. V prostředí Workbench lze analyzovat stavební statiku (Static structural), pružnou dynamiku (Flexible dynamic), pevnou dynamiku (Rigid dynamic), frekvenční odezvu (Harmonic response), ohyb (Linear buckling), otřesy (Random vibration), tvarová optimalizace (Shape optimization), ustálený teplotní stav (Steady-State Thermal), přechod tepla (Transient Thermal) a magnetizmus (Magnetostatic). Tato práce se zaměřuje na teplotní výpočty. Pro simulace bude tedy použita analýza Transient Thermal. Tato analýza umožňuje sledovat přechody tepla v zadaném čase po zadaném kroku.

### 3.3.5 Počáteční podmínky

Počáteční podmínky jsou dalším důležitým faktorem, bez které by simulace nemohly probíhat. Pomoci počátečních podmínek řekneme programu v jakém stavu a v jakém prostředí se součást nacházela před simulací. Například v případě ohybu je nutné určit jak a v kterém místě je ohýbaný předmět uchycen. V případě teplotních výpočtů se zadává například počáteční teplota a teplota okolí.

### 3.3.6 Zdroje tepla

Pro řešený model lze zadat libovolný počet zdrojů tepla, přičemž každý z nich může mít jinou hodnotu. Zdroje tepla mohou působit v jednom bodě, na hraně, na celé ploše a nebo na celém objemu. Na obr. 3.4 můžeme vidět dva zdroje tepla působící na plochu. Zdroj A působí na spodní plochu tělesa a zdroj B na horní stranu tělesa. Zdroje A a B mají rozdílné teploty.

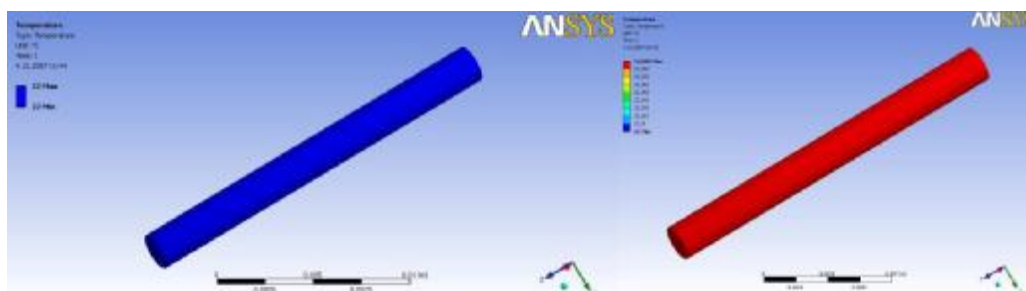


obr. 3.4 Zdroje tepla

### 3.3.7 Vznik tepla

V prostředí Ansys Workbench se oteplení zadává pomocí funkce **Internal heat generation** (ztrátový výkon). Tato funkce má parametr Magnitude pomocí které je zadáváno, kolik Wattů bude přeměněno v teplo v jednom  $\text{m}^3$  materiálu. Internal Heat Generation lze zadávat pouze na celý objem tělesa.

Jako příklad si můžeme uvést drát o průměru 2mm a délce 20mm, který přemění 2000W v teplo v  $1 \text{ m}^3$  hmoty. Na obr. 3.5 můžeme vidět, jak dojde k oteplení vodiče při stejných počátečních hodnotách. Vodič dosáhne oteplení přibližně  $2^\circ\text{C}$ .

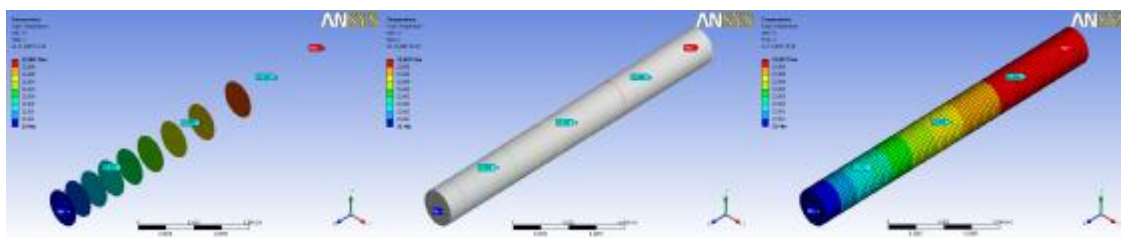


obr. 3.5 Oteplení vodiče



### 3.4 Výsledky simulace

Výstup simulace v prostředí Ansys Workbench je numerický a grafický. To zlepšuje jeho přehlednost a názornost. Jak můžeme vidět na obr. 3.6, na boku je zobrazena legenda, která umožňuje přibližné přirovnání teploty v jakémkoliv místě. Pro přesné určení teploty slouží funkce Min, Max a Probe. Funkce Min a Max ukazuje minimální a maximální teplotu na tělese. Funkce Probe určí teplotu v jakémkoliv místě, tak jak je to patrné z obr. 3.6. Grafický výstup z prostředí Workbench může mít mnoho podob. Na tělese mohou být znázorněny elementy, může mít uhlazené nebo ostré kontury. Výstup může mít také podobu izolinií, popřípadě lze těleso postupně odřezávat, čímž získáme pohled na průřez v kterémkoliv místě tělesa. Ukázka grafických výstupů je na obr. 3.6.



obr. 3.6 Grafické výstupy

#### Report Preview

Prostředí Ansys Workbench umožňuje snadné vytvoření zprávy týkající se nejen výsledku simulace, ale všech parametrů a nastavení. Tato zpráva obsahuje například informace o geometrii, kontaktech, meshování, typu simulace, charakteristiky jednotlivých materiálů a další.

## 4 VYTVOŘENÍ TEPELNÉHO MODELU STROJE V PROGRAMU WORKBENCH

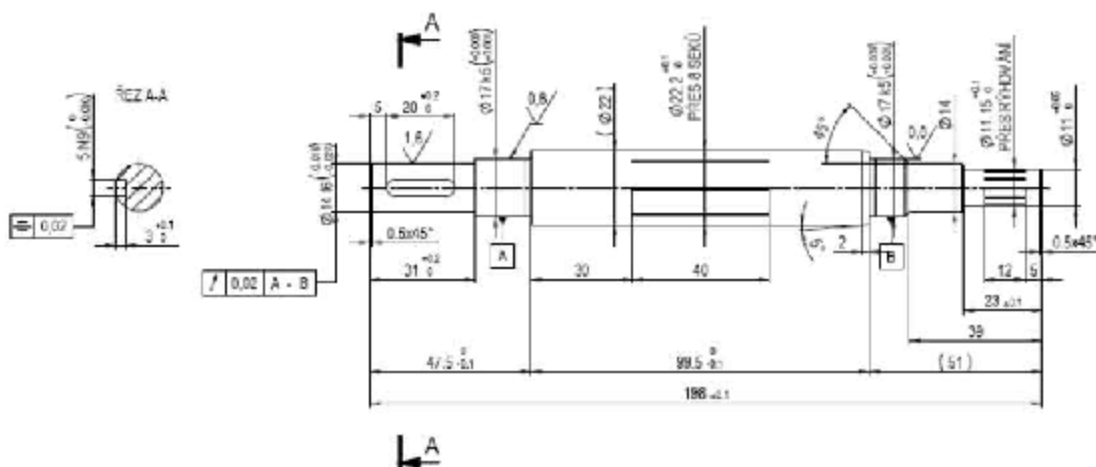
Vzhledem ke značné náročnosti (především u složitějších objektů) na dobu výpočtu byla pro tuto práci zvolena zjednodušená geometrie elektrického motoru. Geometrie byla zvolena podle výkresové dokumentace pro elektricky komutovaný motor. Jednotlivá zjednodušení jsou popsána v kapitolách 4.1.1 - 4.1.8.

### 4.1 Geometrie

Pro tvorbu geometrie byl použit program Autodesk Inventor Professional 2008. Vzhledem k velmi vysoké ceně tohoto produktu, jsem se zaregistroval na internetové stránce <http://students2.autodesk.com/>. Zde je umožněno studentům po řádné registraci zdarma získat studentskou verzi programu Autodesk Inventor. Studentská verze Autodesk Student zahrnuje všechny funkce profesionálních licencí, avšak obsahuje potisk, který znemožňuje software používat pro profesionální, obchodní nebo výdělečné účely. Roční licence softwaru Autodesk Student nejsou vhodné k aktualizaci produktu, nebo k převedení na komerční licenci. Tato verze je tedy pro účel této práce naprosto dostačující.

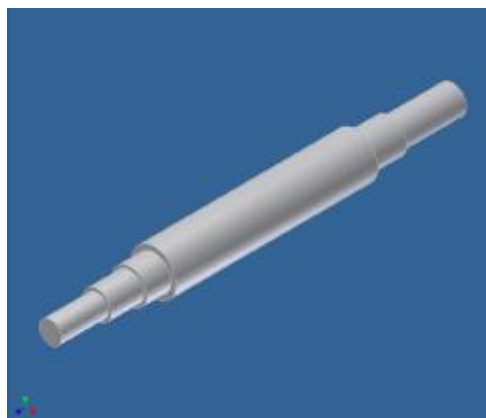
#### 4.1.1 Hřídel

Na obrázku obr. 4.1 je zobrazen nákres hřídele elektronicky komutovaného stroje. Pro zjednodušení však byl vynechán zářez na pero a rýhování o průměru 22,2mm. Toto rýhování slouží pro lepší nalisování rotorového jho na hřídel stroje. Výpočet by také zbytečně prodloužil rýhování o průměru 11,15mm, sloužící pro uchycení čidla polohy rotoru. Jednotlivá zkosení na hranách hřídele také nemají podstatný vliv na výsledek teplotní simulace. Z tohoto důvodu byla zanedbána. Výsledný zjednodušený model hřídele elektricky komutovaného stroje je na obr. 4.2.



obr. 4.1 Nákres hřídele elektronicky komutovaného stroje

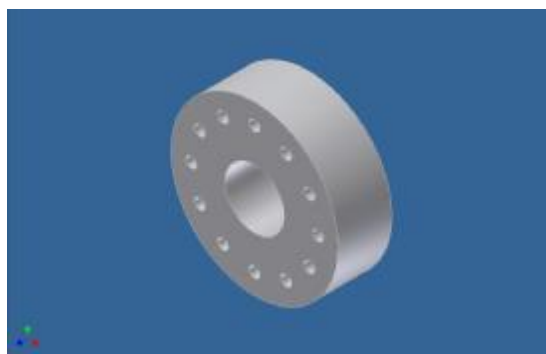
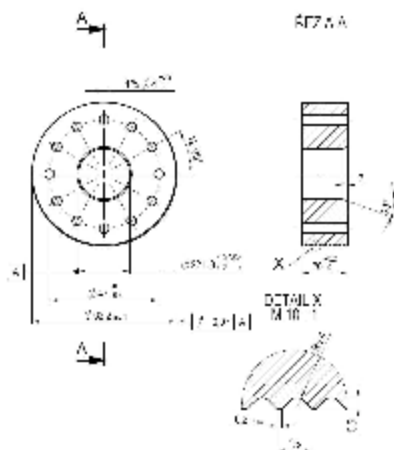




obr. 4.2 Zjednodušený model hřídele elektricky komutovaného stroje

#### 4.1.2 Rotorové jha

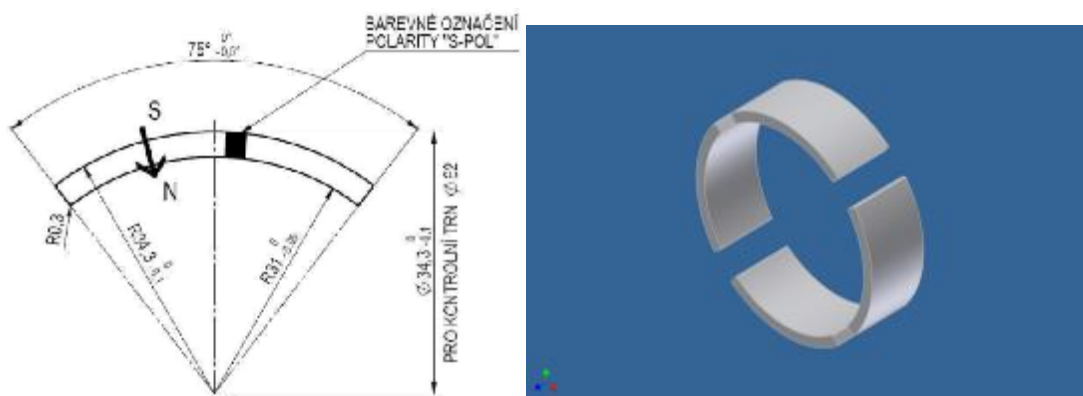
Na obr. 4.3 je náčrtek rotorového jha elektricky komutovaného stroje. Pro opětovné zjednodušení geometrie zde bylo zanedbáno vroubkování na vnějším obvodu, sloužící pro kvalitnější nalepení permanentních magnetů na rotorový svazek. Dvanáct děr, jdoucích přes celý rotorový svazek zůstalo ve zjednodušeném modelu zachováno. Výsledná geometrie je tedy v podobě válce o vnějším průměru 62,2mm s otvorem uprostřed. Vnitřní průměr otvoru má hodnotu 22mm. Tloušťka svazku je 20mm. Náčrtek rotorového jha a jeho zjednodušený model je na obr. 4.3.



obr. 4.3 Náčrtek rotorového jha stroje a zjednodušený model

#### 4.1.3 Permanentní magnety

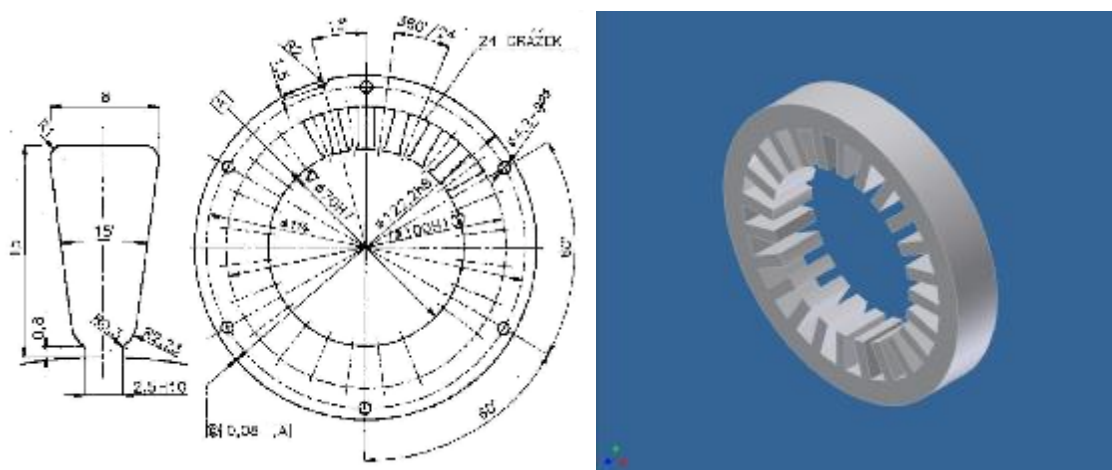
Náčrtek permanentního magnetu je na obr. 4.4. Geometrie permanentního magnetu je sama o sobě jednoduchá. Z tohoto důvodu na ní neproběhly kromě barevného označení pólů a zaoblení hran žádné zjednodušení a byla vytvořena tak, jak je na obr. 4.4. Délka permanentního magnetu je stejná jako tloušťka rotorového svazku a to 20mm. Náčrtek permanentního magnetu a jeho model je na obr. 4.4.



obr. 4.4 Náčes permanentních magnetů stroje a jeho model

#### 4.1.4 Statorový svazek

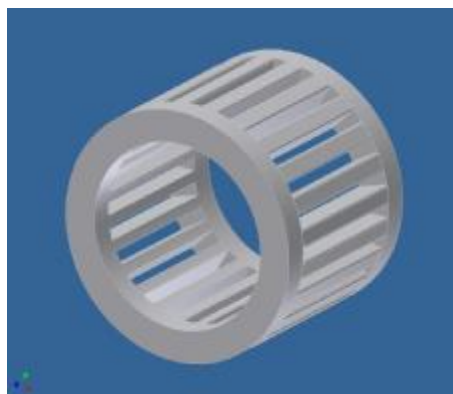
Statorový svazek se u elektronicky komutovaného motoru skládá z plechů. Náčes plechu je na obr. 4.5. Statorový plech je značně členitý a do jeho drážek přijde statorové vinutí. Došlo zde ke značnému zjednodušení statorové části stroje. Drážky statorových plechů určené pro uložení vinutí byly zjednodušeny. Statorový svazek nebyl složen z několika plechů o určité tloušťce, ale pouze z jednoho plechu, který má šířku stejnou jako rotorový svazek (20mm). Tvar výsledné geometrie je zobrazen na obr. 4.5. Náčes statorového obvodu a jeho zjednodušený model je na obr. 4.5.



obr. 4.5 Náčes statorového obvodu stroje a zjednodušený model

#### 4.1.5 Vinutí

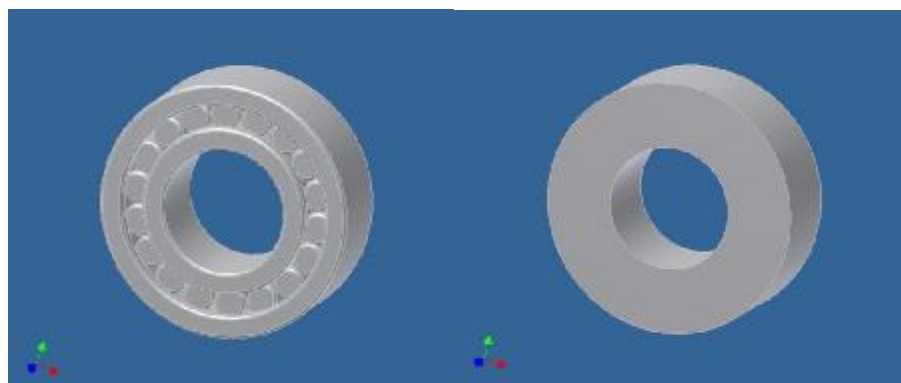
Vinutí elektricky komutovaného motoru je navinuto měděným drátem. Pro zjednodušení byl drát nahrazen tyčemi, které vyplňují drážky statorových plechů bez zbytku. U tepelných výpočtů však nesmíme zanedbat čela vinutí. Z tohoto důvodu jsou čela vinutí nahrazena kruhy, které spojují tyče vinutí. Můžeme si tedy pro zjednodušení představit, že jsme nahradili vinutí stroje klecí jako u asynchronního motoru. Viz. obr. 4.6.



*obr. 4.6 Zjednodušený model vinutí EC motoru*

#### 4.1.6 Ložiska

Na hřídel elektricky komutovaného stroje jsou nalisována ložiska, jejichž vnitřní průměr je 17mm. Vnější průměr ložiska má hodnotu 35mm. Ložiska jsou uložena v ložiskových štítech. Pro zjednodušení bylo ložisko navrženo jako válec s otvorem uprostřed. Tímto krokem opět došlo ke zjednodušení výpočtu. Na obr. 4.7 je model ložiska a zjednodušený model ložiska.



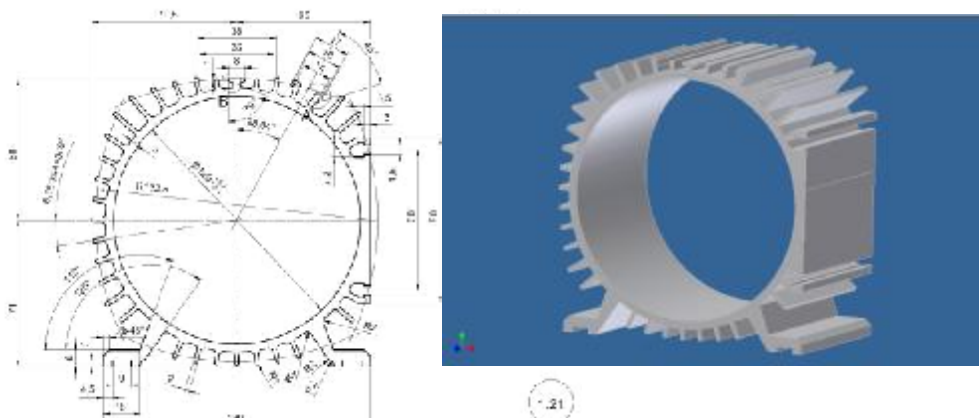
*obr. 4.7 Model ložiska a zjednodušený model ložiska*

#### 4.1.7 Kostra stroje

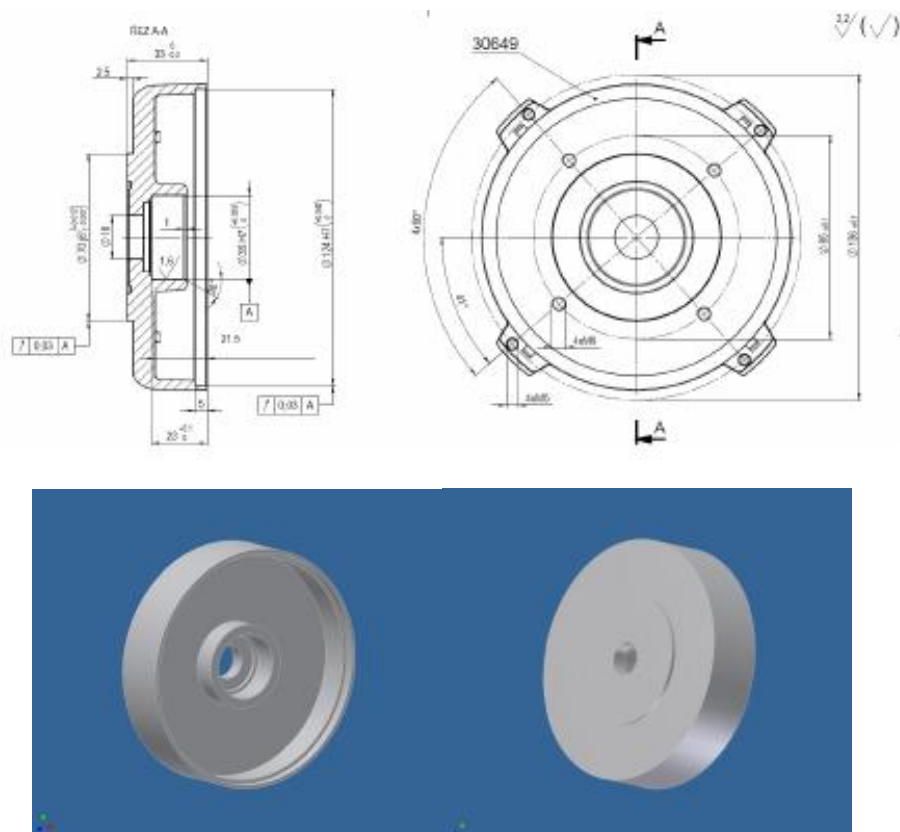
Kostra stroje je značně členitá. Větší zjednodušení jednotlivých žebër kostry by značně ovlivnilo tepelné vlastnosti stroje. Celé zjednodušení spočívá v zanedbání všech zaoblení jednotlivých žebër. Na obr. 4.8 je vyobrazen náčrtek kostry elektronicky komutovaného stroje a jeho model.

#### 4.1.8 Ložiskový štít

Ložiskový štít je také značně členitý. Pro zjednodušení byl model vytvořen bez čtyř děr v čele štítu a bez patek sloužících k sešroubování celého motoru. Náčrtek ložiskového štítu a jeho zjednodušený model jsou na obr. 4.9.



obr. 4.8 Náskres kostry stroje a zjednodušený model kostry

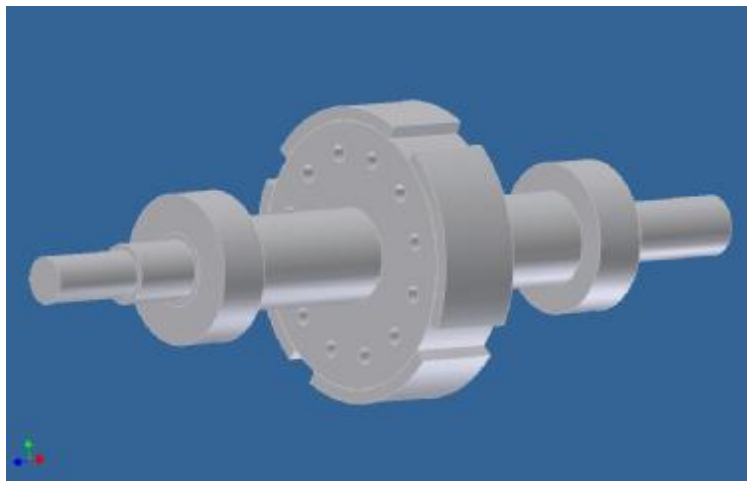


obr. 4.9 Náskres ložiskového štítu a jeho model

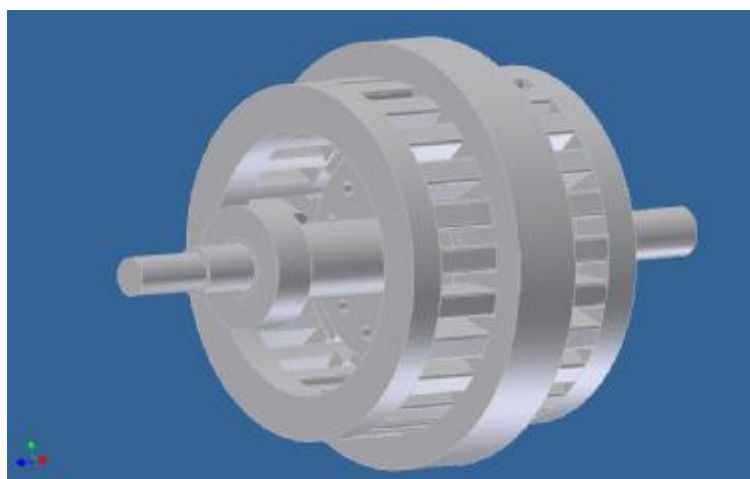
#### 4.1.9 Sestava

Výsledná geometrie vznikla stejně jako jednotlivé součásti v prostředí Autodesk Inventor 2008 Professional. Rotorový svazek byl nasunut svým středem na hřídel a to do vzdálenosti 97,5mm od čela hřídele. Po obvodu rotorového svazku jsou nalepeny permanentní magnety. Vyšetřovaný stroj je čtyřpólový, a z tohoto důvodu jsou na rotoru čtyři permanentní magnety. Jeden magnet zabírá plochu  $75^\circ$

prostorových rotorového svazku. Mezi magnety vznikne tedy mezera  $15^\circ$ . Dále byly na hřídel nalisovány ložiska. Výsledek je vyobrazen na obr. 4.10. V dalším kroku proběhlo nasunutí vinutí do statorových plechů. Statorové vinutí a plechy jsou umístěny soustředně s rotorovým jha. Mezi rotorovým a statorovým svazkem vznikla vzduchová mezera, která je pro chod stroje nezbytná. Geometrie bez kostry stroje a ložiskových štítů je vyobrazena na obr. 4.11.

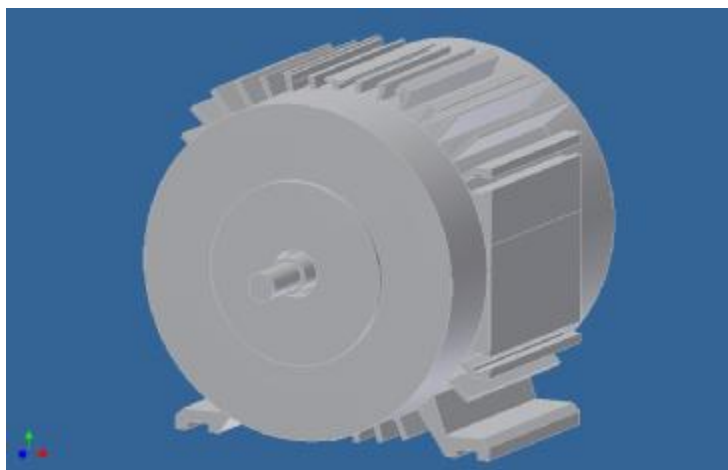


*obr. 4.10 Rotorová část sestavy použitá pro výpočet*



*obr. 4.11 Sestava použitá pro výpočet bez kostry a lož. štítů*

Sestavu z obr. 4.11 je nutno pro přesnější výpočet doplnit kostrou a ložiskovými štíty. Ložiskové štíty jsou nalisovány na ložiska, která jsou již nasunuta na hřídeli. Mezi ložiskovými štíty je kostra, která je pevně přichycena ke statorovým plechům. Sestava na obr. 4.12 je totožná se sestavou použitou pro výpočet teplotních vlastností elektricky komutovaného stroje. Výhodou převodu geometrie z CAD systémů do prostředí Ansys Workbench je zachování a automatické rozpoznání vazeb mezi jednotlivými součástmi.



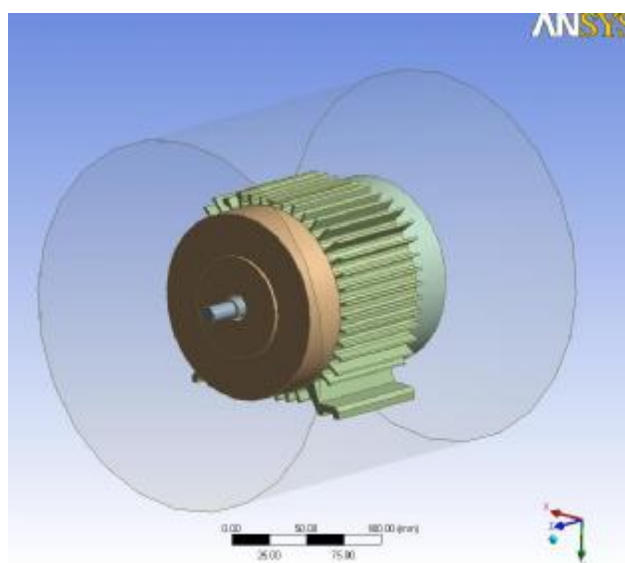
*obr. 4.12 Výsledná sestava použitá pro výpočet teplotních vlastností EC stroje*

## 4.2 Teplotní analýza v prostředí Ansys Workbench

Sestavu geometrií popsanou v kapitolách 4.1.1-4.1.9 importujeme do prostředí Ansys Workbench stejným způsobem, který je popsán v kapitole 3.2.

### 4.2.1 Obalení sestavy vzduchem

Jak je popsáno v kapitole 3.2.3 je nutno vyšetřované těleso obalit vzduchem. Pro geometrii zobrazenou na obr. 4.12 je nejvýhodnější tvar pro obalení vzduchem válec. Například v případě výběru obalového tvaru koule, by byl v okolí kostry počítán zbytečně velký objem vzduchu. Minimální vzdálenost mezi okrajem obaleného vzduchu a součástí byla nastavena na 30mm. Vyšetřované těleso obalené vzduchem ve tvaru válce je zachyceno na obr. 4.13.



*obr. 4.13 Obalení tělesa vzduchem*



## 4.2.2 Meshování

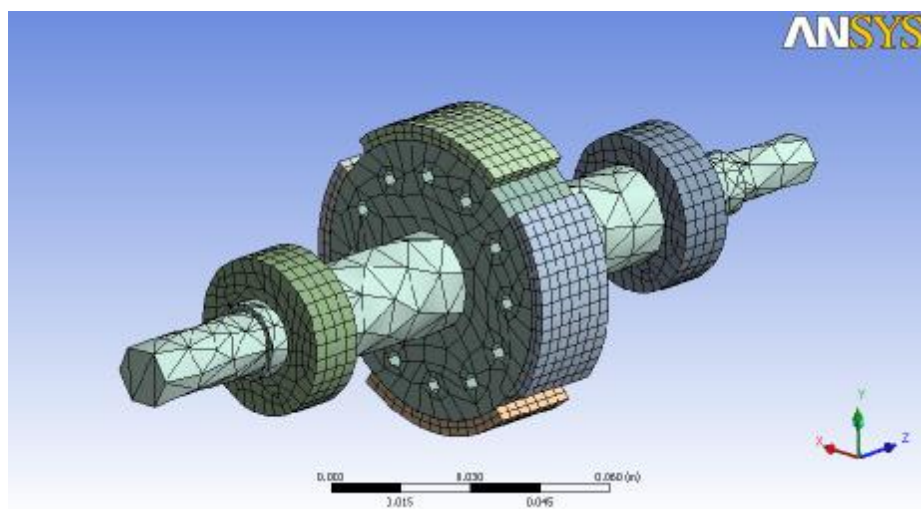
Meshování je jednou z nejdůležitějších částí simulace v prostředí Ansys Workbench. Problematika meshování je podrobněji rozebrána v kapitole 3.3.3. Výslednou sestavu je nutno vymeshovat. Pro prvotní mesh byla použita funkce automatického meshování. Výsledek automatického meshe je na obrázcích obr. 4.14, obr. 4.16 a obr. 4.18. Jak je vidět z těchto obrázků, funkce automatického meshování je pro tuto sestavu nevhodná. Elementy nejsou souměrné a v oblastech přechodů mezi materiály nemají dostatečně malou velikost (malá přesnost výpočtu). Je tedy nutné změnit velikost jednotlivých elementů, popřípadě změnit typ elementů. Pro úpravu této geometrie byla zvolena možnost změny velikosti elementů. Elementy na jednotlivých součástech nemají stejnou velikost a to z toho důvodu, že některé oblasti jsou z teplotního hlediska méně zajímavé, než jiné.

- **Hřídel**

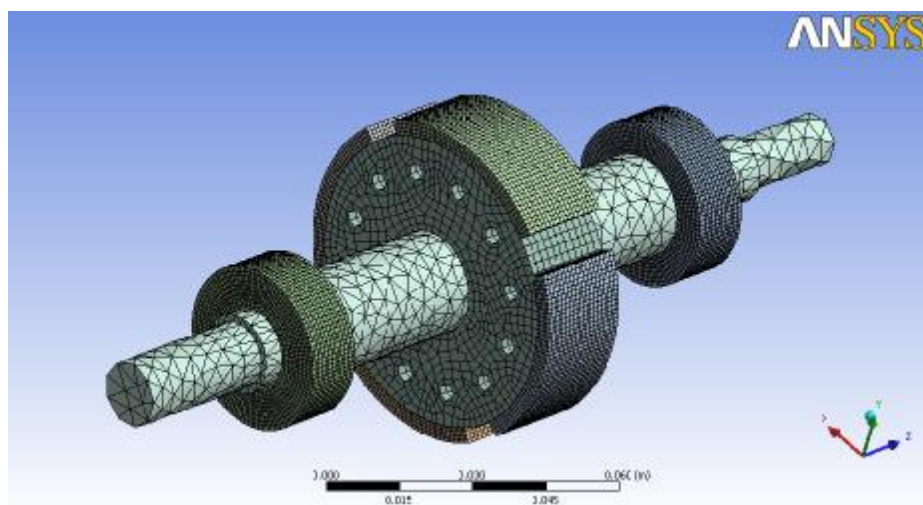
Výsledek automatického meshe hřídele je na obr. 4.14. Hřídel je pro výpočet teplotního pole EC stroje méně podstatná než například vinutí. Z tohoto důvodu byla zvolena velikost elementů na hřídeli  $5 \cdot 10^{-3} m$ . Výsledek meshování po úpravě velikostí elementů je na obrázku obr. 4.15. Počet elementů a nodů pro automatický mesh i pro vygenerovanou síť po změně velikostí elementů je zaznamenán v tab. 2. Tato tabulka obsahuje také poměr počtu prvků automatického meshe a meshe po úpravě. Z tab. 2 je patrné, že se počet nodů a elementů po úpravě velikosti elementů zvětšil přibližně 3-krát.

	Automatický mesh	Upravený mesh	Poměr
<b>Nody</b>	2461	7181	2,9
<b>Elementy</b>	1223	3875	3,2

tab. 2 Počty elementů a nodů při meshování hřídele



obr. 4.14 Automatický mesh – hřídel, rotorové jho, ložiska a perm. magnety



obr. 4.15 Úprava meshe – hřídel, rotorové jho, ložiska a perm. magnety

#### • Ložiska

Výsledek automatického meshe ložisek je na obr. 4.14. Velikost elementů pro ložiska byla nastavena na  $1 \cdot 10^{-3} m$ . Výsledek meshování po úpravě velikostí elementů je na obrázku obr. 4.15. Počet elementů a nodů pro automatický mesh i pro vygenerovanou síť po změně velikostí elementů je zaznamenán v tab. 3. Tato tabulka obsahuje také poměr počtu prvků automatického meshe a meshe po úpravě. Z tab. 3 je patrné, že se počet nodů zvětšil po úpravě velikosti elementů 25-krát a počet elementů 31-krát.

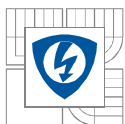
	Automatický mesh	Upravený mesh	Poměr
<b>Nody</b>	2103	52312	24,9
<b>Elementy</b>	372	11570	31,1

tab. 3 Počty elementů a nodů při meshování hřídele

#### • Rotorové jha

Výsledek automatického meshe rotorového jha je na obr. 4.14. Velikost elementů pro rotorového jha byla nastavena na  $2 \cdot 10^{-3} m$ . Výsledek meshování po úpravě velikostí elementů je na obrázku obr. 4.15. Počet elementů a nodů pro automatický mesh i pro vygenerovanou síť po změně velikostí elementů je zaznamenán v tab. 4. Tato tabulka obsahuje také poměr počtu prvků automatického meshe a meshe po úpravě. Z tab. 4 je patrné, že se počet nodů zvětšil po úpravě velikosti elementů 5-krát a počet elementů 6-krát.





	Automatický mesh	Upravený mesh	Poměr
Nody	6477	34713	5,4
Elementy	1176	7337	6,2

*tab. 4 Počty elementů a nodů při meshování rotorového jha*

- **Permanentní magnety**

Výsledek automatického meshe permanentních magnetů je na obr. 4.14. Velikost elementů pro permanentní magnety byla nastavena na  $1 \cdot 10^{-3} m$ . Výsledek meshování po úpravě velikostí elementů je na obrázku obr. 4.15. Počet elementů a nodů pro automatický mesh i pro vygenerovanou síť po změně velikostí elementů je zaznamenán v tab. 5. Tato tabulka obsahuje také poměr počtu prvků automatického meshe a meshe po úpravě. Z tab. 5 je patrné, že se počet nodů zvětšil po úpravě velikosti elementů 13-krát a počet elementů 16-krát.

	Automatický mesh	Upravený mesh	Poměr
Nody	1336	17231	12,9
Elementy	210	3440	16,4

*tab. 5 Počty elementů a nodů při meshování permanentních magnetů*

- **Statorové vinutí**

Výsledek automatického meshe statorového vinutí je na obr. 4.16. Velikost elementů pro rotorového jho byla nastavena na  $4 \cdot 10^{-3} m$ . Výsledek meshování po úpravě velikostí elementů je na obrázku obr. 4.17. Počet elementů a nodů pro automatický mesh i pro vygenerovanou síť po změně velikostí elementů je zaznamenán tab. 6. Tato tabulka obsahuje také poměr počtu prvků automatického meshe a meshe po úpravě. Z tab. 6 je patrné, že se počet nodů a elementů zvětšil po úpravě velikosti elementů 1,5-krát.

	Automatický mesh	Upravený mesh	Poměr
Nody	60426	81549	1,3
Elementy	31372	41056	1,3

*tab. 6 Počty elementů a nodů při meshování statorového vinutí*

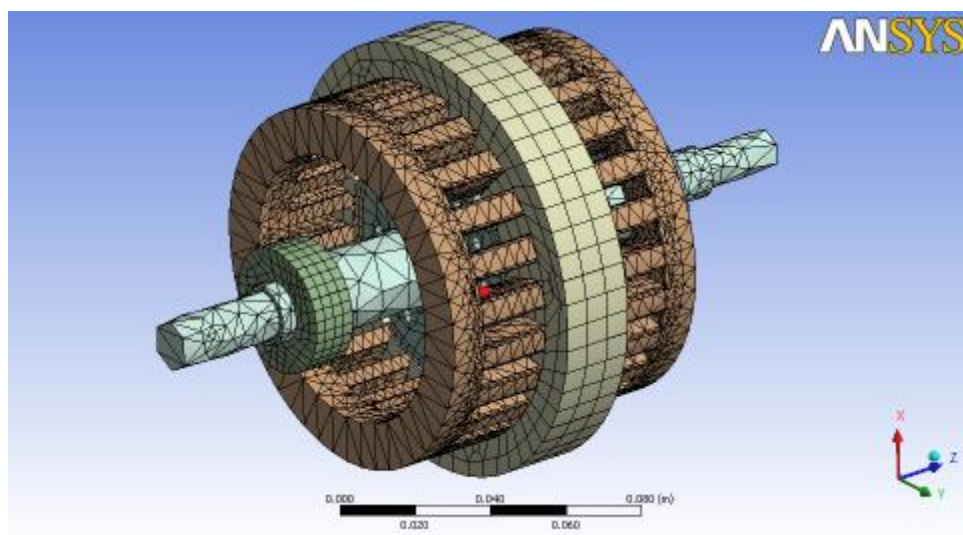
- **Statorové plechy**

Výsledek automatického meshe statorového vinutí je na obr. 4.16. Velikost elementů pro rotorového jho byla nastavena na  $3 \cdot 10^{-3} m$ . Výsledek meshování po

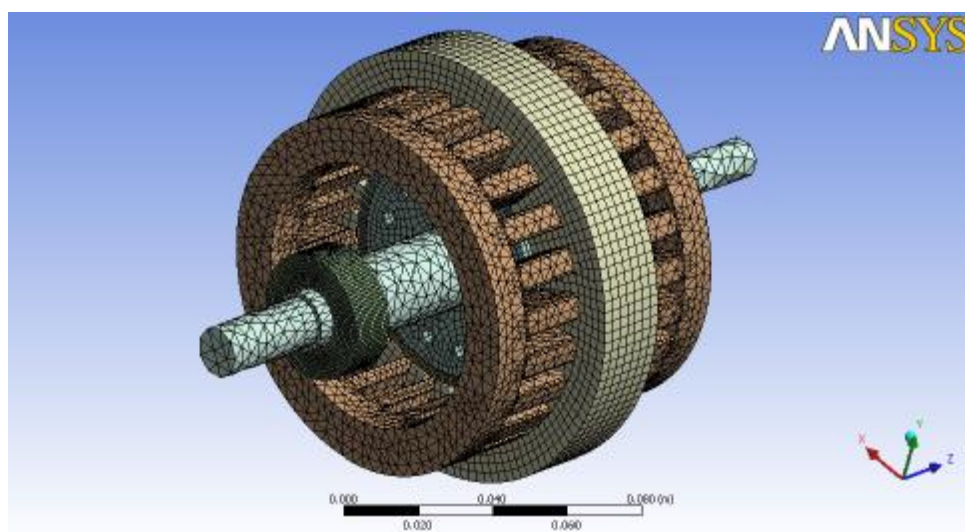
úpravě velikostí elementů je na obrázku obr. 4.17. Počet elementů a nodů pro automatický mesh i pro vygenerovanou síť po změně velikostí elementů je zaznamenán tab. 7. Tato tabulka obsahuje také poměr počtu prvků automatického meshe a meshe po úpravě. Z tab. 7 je patrné, že se počet nodů zvětšil po úpravě velikosti elementů 6-krát a počet elementů 9-krát.

	Automatický mesh	Upravený mesh	Poměr
<b>Nody</b>	4736	30500	6,4
<b>Elementy</b>	648	5516	8,5

tab. 7 Počty elementů a nodů při meshování satorových plechů



obr. 4.16 Automatický mesh – satorové plechy a vinutí



obr. 4.17 Úprava meshe – satorové plechy a vinutí

- **Ložiskový štít**

Výsledek automatického meshe ložiskového štítu je na obr. 4.18. Velikost elementů pro ložiskový štít byla nastavena na  $5 \cdot 10^{-3} m$ . Výsledek meshování po úpravě velikostí elementů je na obrázku obr. 4.19. Počet elementů a nodů pro automatický mesh i pro vygenerovanou síť po změně velikostí elementů je zaznamenán tab. 8. Tato tabulka obsahuje také poměr počtu prvků automatického meshe a meshe po úpravě. Z tab. 8 je patrné, že se počet nodů a elementů zvětšil po úpravě velikosti elementů 5-krát.

	Automatický mesh	Upravený mesh	Poměr
<b>Nody</b>	4849	22102	4,6
<b>Elementy</b>	2285	11653	5,1

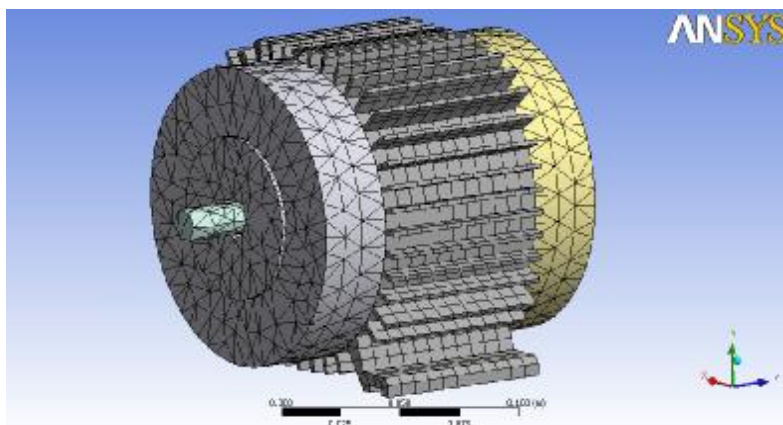
tab. 8 Počty elementů a nodů při meshování ložiskového štítu

- **Kostra motoru**

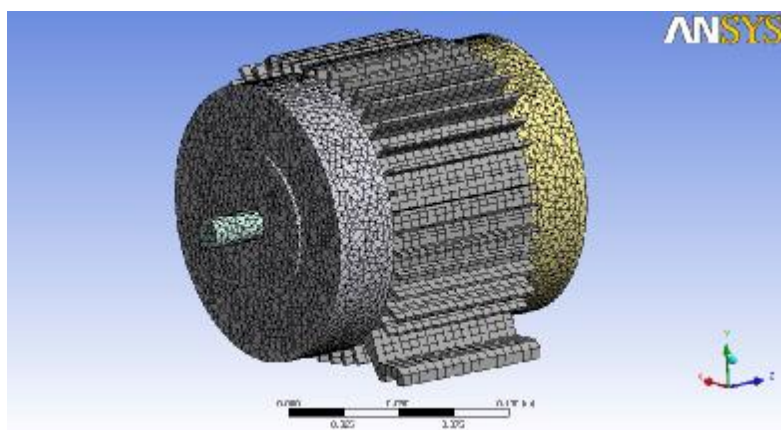
Výsledek automatického meshe kostry motoru je na obr. 4.18. Velikost elementů pro kostru rotoru byla nastavena na  $5 \cdot 10^{-3} m$ . Výsledek meshování po úpravě velikostí elementů je na obrázku obr. 4.19. Počet elementů a nodů pro automatický mesh i pro vygenerovanou síť po změně velikostí elementů je zaznamenán tab. 9. Tato tabulka obsahuje také poměr počtu prvků automatického meshe a meshe po úpravě. Je patrné, že se počet nodů a elementů zvětšil po úpravě velikosti elementů 2-krát.

	Automatický mesh	Upravený mesh	Poměr
<b>Nody</b>	17005	30519	1,8
<b>Elementy</b>	2530	4912	1,9

tab. 9 Počty elementů a nodů při meshování kostry motoru



obr. 4.18 Automatický mesh – kostra a ložiskové štíty



obr. 4.19 Úprava meshe – kostra a ložiskové štíty

Celkový součet nodů u automatického meshe je 110353, zatímco u upraveného meshe jsou elementy spojeny celkem ve 402214 bodech. Jedná se tedy takřka o čtyřnásobný nárůst nodů. Model stroje byl dále při automatickém meshi rozdělen na 43103 elementů. Úpravou velikostí elementů došlo ke zhuštění sítě, která poté obsahovala 122902 elementů. Upravená síť elementů měla tedy přibližně trojnásobnou hustotu.

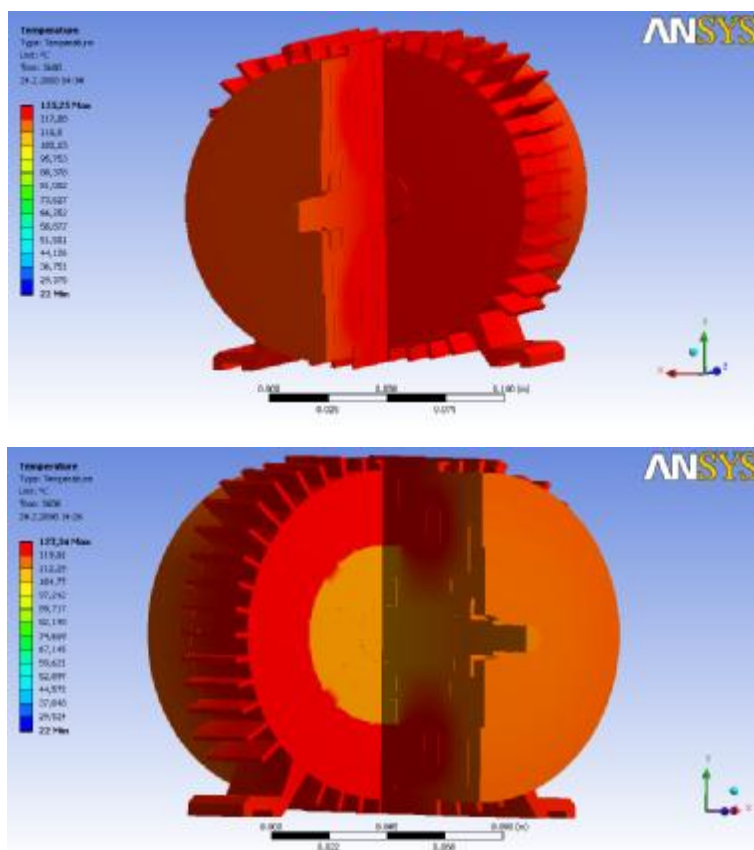
#### 4.2.3 Závislost meshe na výsledku simulace

Již v předchozích kapitolách bylo uvedeno, že kvalita meshe má značný vliv na přesnost výpočtu. V této kapitole bude toto tvrzení ověřeno.

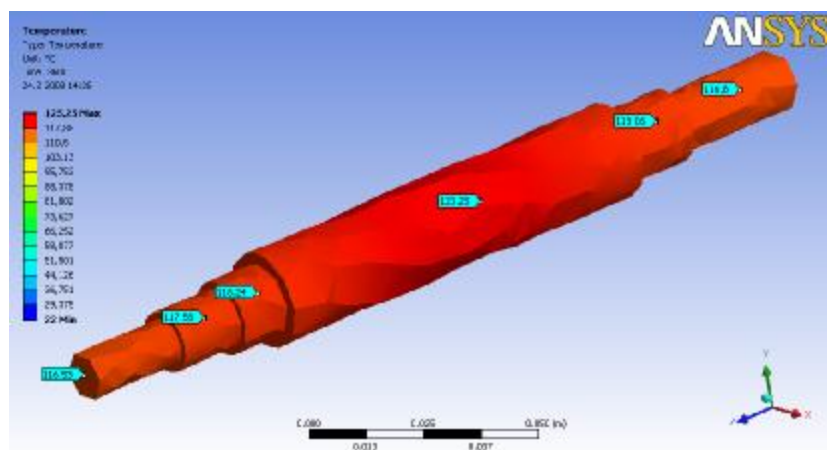
Pro ověření proběhly dva výpočty pro totožný model při naprosto stejných počátečních podmínkách a pro stejnou dobu simulace. V tomto případě byla jako doba simulace nastavena doba 3600s. Jediný rozdíl u těchto dvou výpočtů spočívá v kvalitě meshe. První výpočet proběhl pro automatický mesh a druhý pro síť elementů, která měla proti síti vygenerované automatickým meshem přibližně trojnásobnou hodnotu. Při prvním výpočtu maximální teplota na modelu dosáhla hodnoty 125,25°C. Po úpravě meshe se tato hodnota změnila na hodnotu 127,34°C. Rozdíl maximálních teplot činil tedy přes 2°C. Přehled maximálních teplot na obou modelech pro třináct různých časových okamžiků je v tab. 10. Pro vyhodnocení výsledků se však maximální hodnoty nevyužívá. Na obr. 4.20 je vyobrazen výsledek simulace po 3600 sekundách. V horní části obr. 4.20 je výsledek simulace pro automaticky vygenerovanou síť, zatímco ve spodní části obr. 4.20 je výsledek simulace pro zjemněnou síť elementů. Z obr. 4.20 je vidět značný rozdíl ve výsledcích jednotlivých simulací.

Pro detailnější porovnání rozdílů byla vybrána hřídel. Na obr. 4.21 je znázorněn výsledek simulace při automatickém meshi a na obr. 4.22 výsledek analýzy při upravené síti elementů. Jak je vidět z tvaru hřídele z obr. 4.21 je automatický mesh nevyhovující. Průřez hřídele má mít tvar válce. Na první pohled je z obr. 4.21 patrné, že tomu tak není. Není tomu tak však ani na obr. 4.22. Pro potřebu porovnání je však

upravený mesh dostačující. Porovnáním obr. 4.21 a obr. 4.22 zjistíme, že se teploty přibližně ve stejných bodech mohou lišit až o 11°C. Tato skutečnost je patrná i z odstínu výsledku simulace hřídele. Porovnání teplot v různých bodech hřídele pro různou hustotu meshe je zaznamenáno na obr. 4.23. obr. 4.24 ukazuje maximální hodnoty, kterých bylo dosaženo pro různou hustotu sítě elementů.

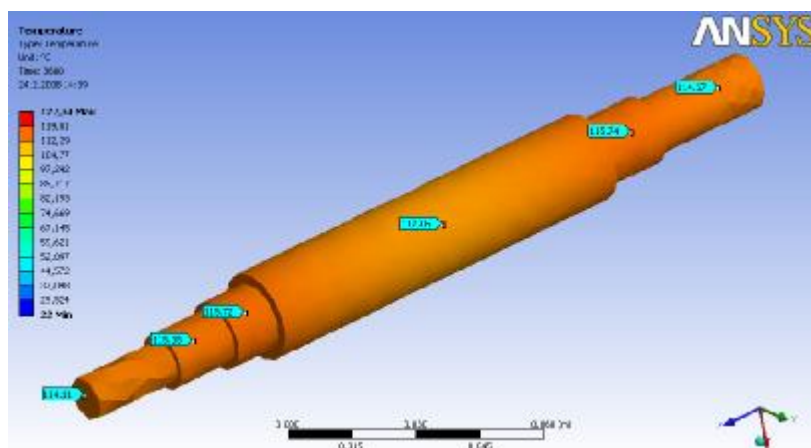


obr. 4.20 Výsledek simulace při automatickém meshi a při meshi upraveném

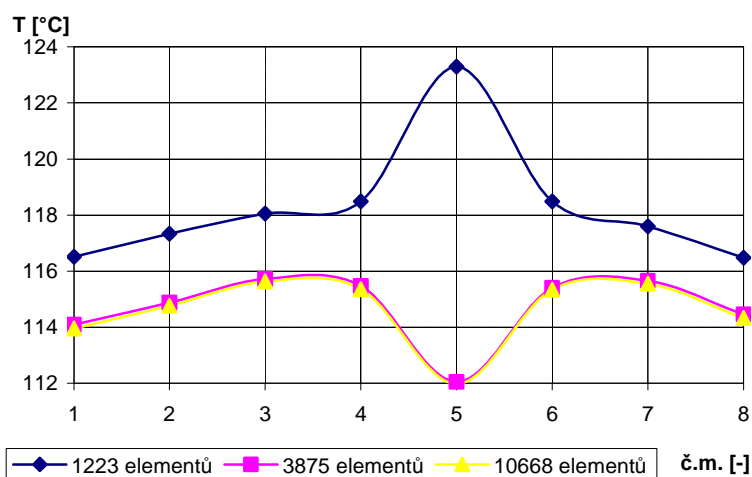


obr. 4.21 Výsledek simulace hřídele při automatickém meshi

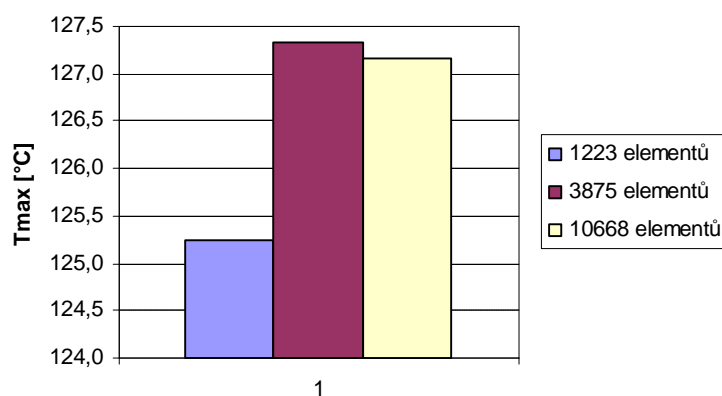




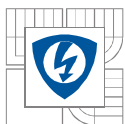
obr. 4.22 Výsledek simulace hřídele při upraveném meshi



obr. 4.23 Porovnání teplot v různých bodech hřídele pro různou kvalitu meshe



obr. 4.24 Maximální dosažené teploty pro různou hustotu meshe



		Automatický mesh		Upravený mesh	
Č.m.	Čas [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]	Minimum [°C]	Maximum [°C]
1	36	22	24,10	22	24,29
2	72	22	25,77	22	26,18
3	180	22	29,78	22	30,67
4	504	22	39,78	22	41,46
5	864	22	50,19	22	52,30
6	1224	22	60,36	22	62,65
7	1584	22	70,40	22	72,74
8	1944	22	80,36	22	82,69
9	2304	22	90,24	22	92,53
10	2664	22	100,05	22	102,29
11	3024	22	109,80	22	111,98
12	3384	22	119,47	22	121,59
13	3600	22	125,25	22	127,34

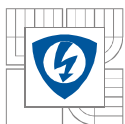
*tab. 10 Přehled maximálních teplot při různé hustotě sítě elementů pro různé časové okamžiky*

#### 4.2.4 Vlastnosti EC stroje

##### Obecné vlastnosti EC stroje

Název	Označení	Hodnota	Jednotka
Počet drážek na pól a fázi	q	2	-
Jmenovitý moment	M	1,6	N.m
Jmenovité otáčky	n	3600	min <sup>-1</sup>
Napájecí napětí	U <sub>D</sub>	24	V
Poloměr rotoru	r <sub>rot</sub>	0,0343	m
Délka rotoru (mag. obvodu)	l	0,02	m
Počet pólů	2p	4	-
Celkový počet drážek rotoru	Q	24	-
Úhlová rychlost	ω <sub>max</sub>	376,99	rad/s
Frekvence napájecího proudu	f <sub>max</sub>	120	Hz
Požadovaný výkon	P	603	W
Počet vodičů v drážce	N/q	6	-
Celkové ztráty stroje	P <sub>z,celk</sub>	104,33	W

*tab. 11 Obecné vlastnosti EC stroje*



### Použité materiály a ztráty v motoru

- **jha statoru** - použitý materiál: Křemíková ocel

Název	Označení	Hodnota	Jednotka
Hysterezní ztráty v jha statoru	$P_{hSjho}$	5,41	W
Hysterezní ztráty v zubech statoru	$P_{hz}$	4,18	W
Vířivé ztráty v jha statoru	$P_{vSjho}$	11,76	W
Vířivé ztráty v zubech statoru	$P_{vz}$	9,08	W
<b>Celkové ztráty ve statoru</b>	<b><math>P_{Scelk}</math></b>	<b>30,43</b>	<b>W</b>

tab. 12 Ztráty ve statoru

V [m <sup>3</sup> ]	m [kg]	$P_{Scelk}$ [W]	Internal Heat Generation [W/m <sup>3</sup> ]
$1,0581 \cdot 10^{-04}$	0,83	30,43	<b>287590,97</b>

tab. 13 Vlastnosti statorového jha stroje a ztrátový výkon

- **Vinutí** - použitý materiál: Měď

V [m <sup>3</sup> ]	m [kg]	$P_{cu}$ [W]	Internal Heat Generation [W/m <sup>3</sup> ]
$1,8526 \cdot 10^{-04}$	1,54	43,91	<b>237018,25</b>

tab. 14 Vlastnosti vinutí stroje a ztrátový výkon

- **Ložiska** - použitý materiál: Structural Steel

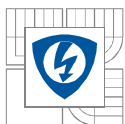
Odhad ostatních ztrát (mechanických a dalších) je 30W. Součástí stroje jsou dvě ložiska. V následující tabulce je uveden objem, hmotnost i celkový ztrátový výkon vztahující se k jednomu ložisku.

V [m <sup>3</sup> ]	m [kg]	$P_{mech}$ [W]	Internal Heat Generation [W/m <sup>3</sup> ]
$8,8216 \cdot 10^{-06}$	$6,9249 \cdot 10^{-02}$	10	<b>1133581,21</b>

tab. 15 Vlastnosti ložiska stroje a ztrátový výkon

- **Permanentní magnety**- použitý materiál: NdFeB (Neodym-železo-bór)
- **Hřídel** - použitý materiál: Structural Steel
- **Ložiskový štít** - použitý materiál: Hliník
- **Kostra stroje** - použitý materiál: Hliník
- **Rotorové jha** - Structural Steel





Jednotlivé vypočtené hodnoty Internal heat generation slouží pro zadání oteplování jednotlivých částí stroje, viz kapitola 3.3.7.

#### 4.2.5 Typ použité analýzy

Pro teplotní výpočet byla použita analýza Transient thermal. Tato analýza umožňuje sledovat přechody tepla v zadaném čase po zadaném kroku. Pro výpočet v této práci byl krok nastaven na jednu sekundu a celková doba simulace na 3600s. Sestava je obalena do vzduchu viz. kapitola 4.2.1. Vzduch v okolí sestavy má tvar válce s minimální vzdáleností 30mm od každého bodu soustavy. Na povrch tohoto válce působí teplota 22°C (pokojová teplota). Teplota 22°C zajistí na počátku simulace stejné teplotní vlastnosti v oblasti vyšetřovaného tělesa. Počáteční teplota soustavy je nastavena také na 22°C.

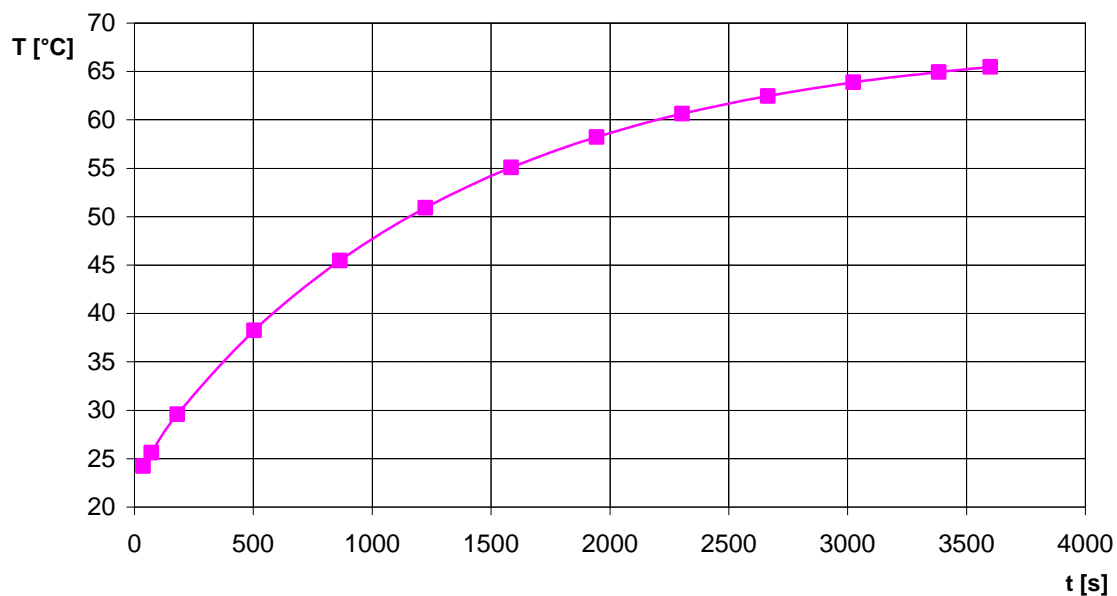
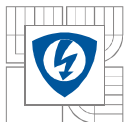
Pro výpočet už zbývá zadat pouze zdroje tepla v motoru a to pomocí funkce Internal Heat Generation (ztrátový výkon) viz. kapitola 3.3.7. Ztrátový výkon se zadává ve  $W/m^3$ . Pro zadání hodnot ztrátového výkonu je tedy nutné provést přepočet, který již proběhl v kapitole 4.2.4. Výsledky jsou uvedeny v tab. 13, tab. 14, a tab. 15.

### 4.3 Výsledky simulace v prostředí Ansys Workbench

Simulace proběhla za podmínek uvedených v předchozích kapitolách. Výsledky vypočtených hodnot jsou uvedeny v tab. 16 a průběh vypočítané oteplovací charakteristiky je zaznamenán na obr. 4.25.

Č.m.	Čas [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]
1	36	22	24,233
2	72	22	25,633
3	180	22	29,596
4	504	22	38,267
5	864	22	45,467
6	1224	22	50,921
7	1584	22	55,070
8	1944	22	58,230
9	2304	22	60,636
10	2664	22	62,470
11	3024	22	63,867
12	3384	22	64,932
13	3600	22	65,469

tab. 16 Vypočítané hodnoty oteplovací charakteristiky v prostředí Ansys Workbench



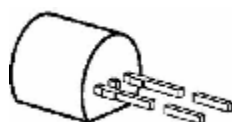
obr. 4.25 Vypočítaný průběh oteplovací charakteristiky

## 5 MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO POLE EC STROJE

Za účelem ověření výsledku teplotní analýzy provedené v prostředí Ansys Workbench, proběhlo měření oteplovací charakteristiky elektricky komutovaného stroje. Parametry měření jsou uvedeny v tab. 18.

### 5.1 Použité čidlo pro měření teploty

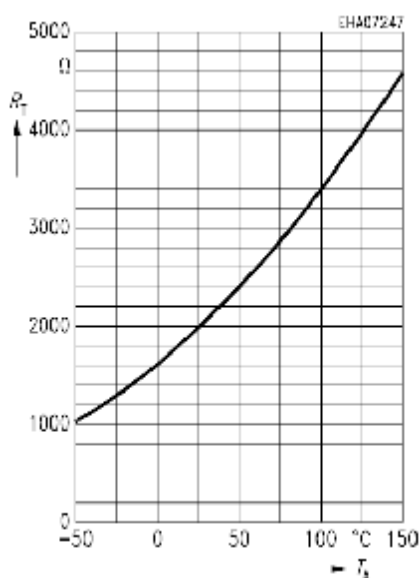
Vzhledem k tomu, že měřený stroj byl prototyp, nebylo možné umístění žádného teplotního čidla do vnitřní části motoru. Z tohoto důvodu proběhlo měření oteplovací charakteristiky pouze na povrchu kostry. Pro měření teploty byl použit termistor typu KTY10D-M. Tvar pouzdra je vyobrazen na obr. 5.1. V tab. 17 jsou uvedeny vlastnosti termistoru KTY10D-M. Závislost odporu termistoru na teplotě je zachycena na obr. 5.2.



obr. 5.1 Tvar pouzdra termistoru KTY10D-M

Teplotní rozsah [°C]	R [Ω]	Tolerance [%]	při [°C]	I čidla [mA]
-55...+150	1940-2060	±3	25	5

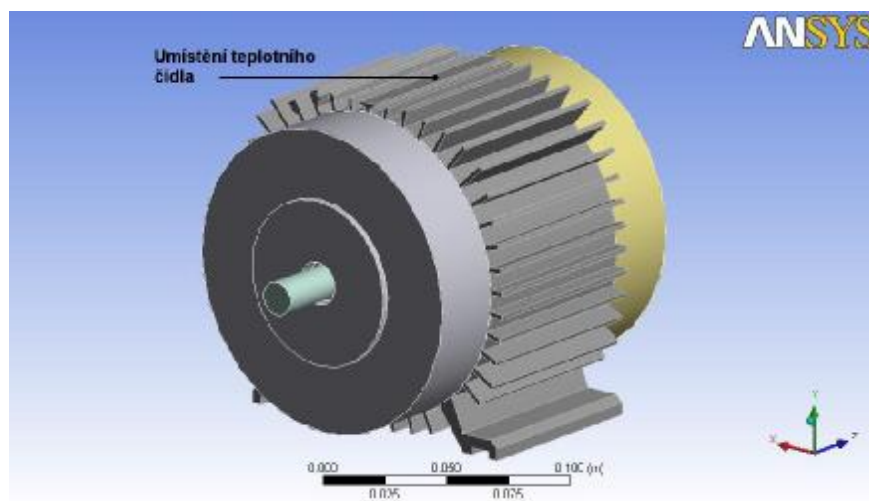
tab. 17 Vlastnosti termistoru KTY10D-M



obr. 5.2 Závislost odporu termistoru na teplotě

## 5.2 Přichycení a umístění čidel

Pro měření bylo nutné připevnit čidlo na kostru statoru. S připevněním však byly značné potíže. Při prvním měření bylo čidlo připevněno k motoru elektrikářskou páskou. Toto řešení se však se zvyšující teplotou motoru projevilo jako nevyhovující. Přibližně kolem 40°C začalo lepidlo na pásce ztrácet svoje vlastnosti a čidlo tím ztratilo dostatečnou přilnavost ke kostře motoru. Při 50°C pak čidlo odpadlo úplně. Při druhém měření, kdy bylo čidlo připevněno mezi žebra stroje klínky se ukázalo toto uchycení vlivem vibrací opět jako nevyhovující. Nakonec bylo uchycení čidla k motoru vyřešeno pomocí speciálního přípravku, který čidlo přitlačoval ke kostře motoru dostatečnou silou. Z obr. 5.3 je patrné, ve kterém místě kostry proběhlo měření. Vzhledem k tomu, že se jednalo o prototyp stroje, nebylo možné umístit teplotní čidlo do vnitřní části stroje (například na statorové plechy).



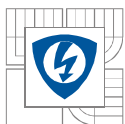
obr. 5.3 Umístění teplotního čidla

n [ot/min]	U [V]	T <sub>0</sub> [°C]	M <sub>z</sub> [Nm]
2950	20	22	1,6

tab. 18 Parametry měření

## 5.3 Naměřené hodnoty

Měření oteplovací charakteristiky EC stroje proběhlo při jmenovitém zatížení od počáteční teploty 24°C. Snímání teploty se opakovalo každé půl minuty. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 19. Měření bylo ukončeno po jedné hodině přestože se teplota stroje ještě úplně neustálila. Docházelo však pouze k malým změnám teploty za velké časové úseky. Simulace v prostředí Ansys Workbench je hardwarově a časově značně náročná. Výpočet teplotního pole pro jednu hodinu trval na školním, velmi výkonném počítači přes tři hodiny. Na dnes běžném počítači se doba jednoho výpočtu vyšplhala na šestnáct až dvacet hodin. Velikost výsledného souboru v megabajtech přesáhla hodnotu 2500. Tyto skutečnosti vedly také k ukončení měření

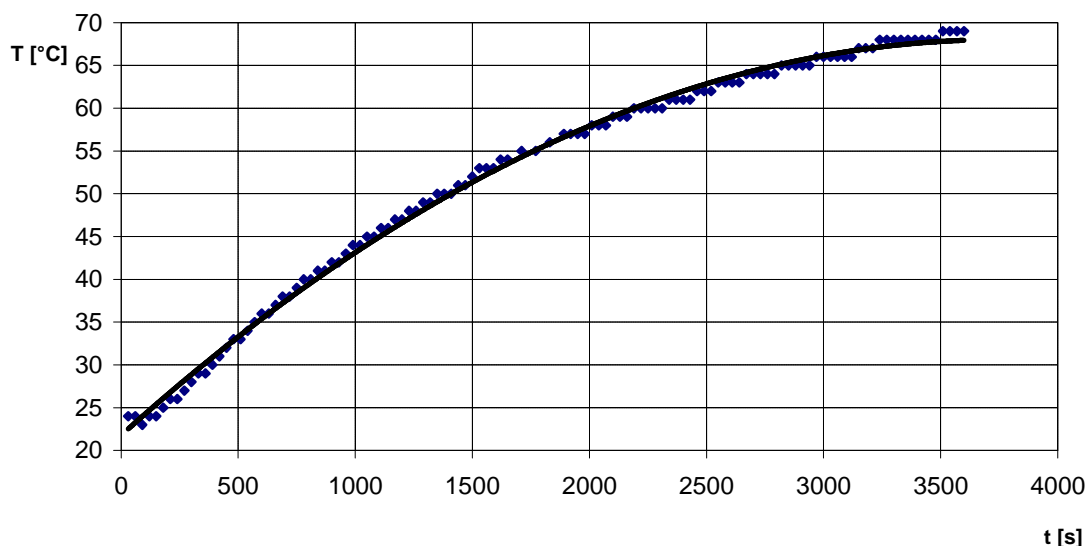


oteplovací charakteristiky po jedné hodině. Simulace teplotního pole například pro dvě hodiny by vedla k značnému prodloužení doby výpočtu a velikosti výsledného souboru.

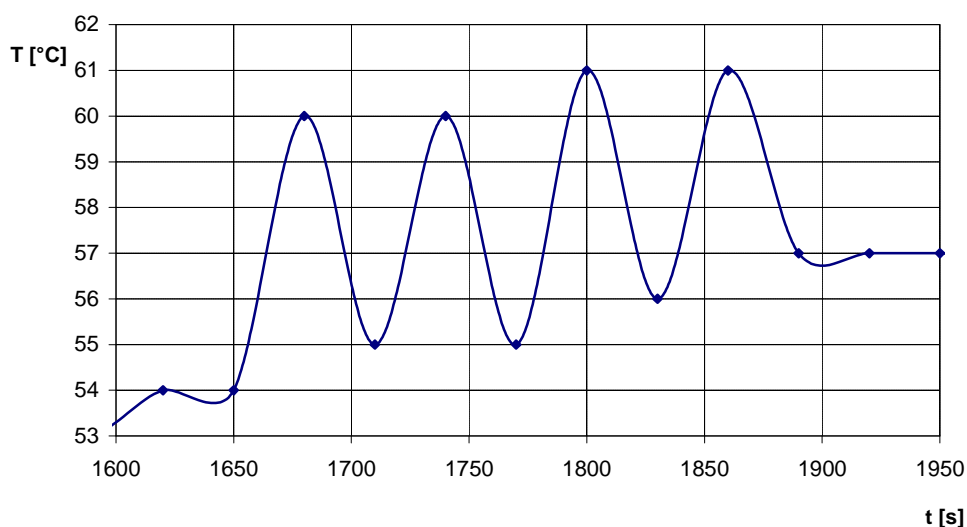
t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]
30	24	930	42	1830	56	2730	64
60	24	960	43	1860	61	2760	64
90	23	990	44	1890	57	2790	64
120	24	1020	44	1920	57	2820	65
150	24	1050	45	1950	57	2850	65
180	25	1080	45	1980	57	2880	65
210	26	1110	46	2010	58	2910	65
240	26	1140	46	2040	58	2940	65
270	27	1170	47	2070	58	2970	66
300	28	1200	47	2100	59	3000	66
330	29	1230	48	2130	59	3030	66
360	29	1260	48	2160	59	3060	66
390	30	1290	49	2190	60	3090	66
420	31	1320	49	2220	60	3120	66
450	32	1350	50	2250	60	3150	67
480	33	1380	50	2280	60	3180	67
510	33	1410	50	2310	60	3210	67
540	34	1440	51	2340	61	3240	68
570	35	1470	51	2370	61	3270	68
600	36	1500	52	2400	61	3300	68
630	36	1530	53	2430	61	3330	68
660	37	1560	53	2460	62	3360	68
690	38	1590	53	2490	62	3390	68
720	38	1620	54	2520	62	3420	68
750	39	1650	54	2550	63	3450	68
780	40	1680	60	2580	63	3480	68
810	40	1710	55	2610	63	3510	69
840	41	1740	60	2640	63	3540	69
870	41	1770	55	2670	64	3570	69
900	42	1800	61	2700	64	3600	69

*tab. 19 Naměřené hodnoty*

Hodnoty z tab. 19 jsou vyneseny do grafu na obr. 5.4.

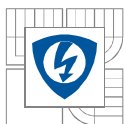


obr. 5.4 Oteplovací charakteristika EC motoru



obr. 5.5 Průběh naměřených hodnot teploty při chvění stroje

V časové oblasti cca 1650 sekund až 1900 sekund došlo při měření k náhlému chvění stroje, což způsobilo nedostatečnou přilnavost teplotního čidla ke kostře stroje. Tato skutečnost byla napravena dotažením úchytného systému motoru. V obr. 5.4 byly chybné hodnoty vynechány, což vzhledem k množství naměřených dat průběh nějak neovlivní. Detailní průběh z naměřených hodnot v době chvění stroje je na obr. 5.5.



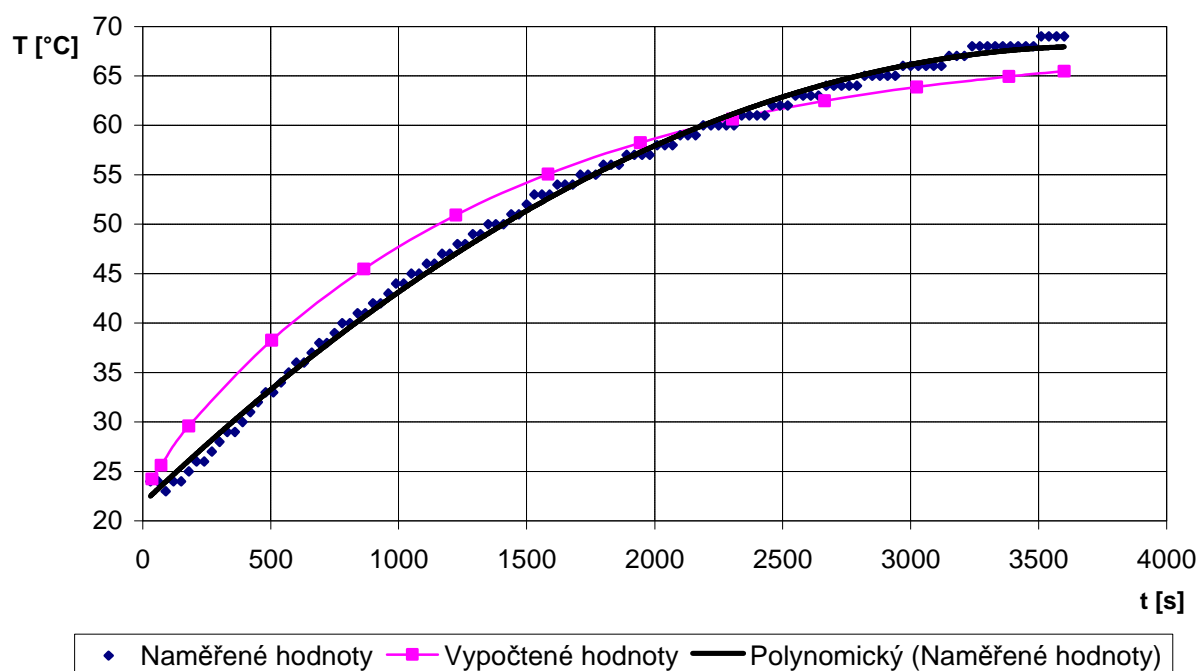
## 6 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT

Na obr. 6.1 jsou v jednom grafu vyneseny naměřené a vypočtené průběhy oteplovací charakteristiky EC stroje. Z obr. 6.1 je patrné, že se podařilo dosáhnout velice slušných výsledků simulace. Průměrná procentuální chyba mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami je 4,04%. Porovnání naměřených a vypočtených hodnot je uvedeno v tab. 20.

t [s]	T <sub>vypočítaná</sub> [°C]	T <sub>naměřená</sub> [°C]	DT [%]
36	24,23	24	-0,97
72	25,63	24	-6,8
180	29,60	25	-18,38
504	38,27	33	-15,96
864	45,47	41	-10,90
1224	50,92	48	-6,09
1584	55,07	53	-3,91
1944	58,23	57	-2,16
2304	60,64	60	-1,06
2664	62,47	63	0,84
3024	63,87	66	3,23
3384	64,93	68	4,51
3600	65,47	69	5,12
Průměrná chyba mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami			-4,04%

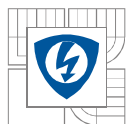
*tab. 20 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot*

Odchytky mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami jsou způsobeny nejen chybou měření, ale také úpravami geometrie, které proběhly pro zjednodušení výpočtu. Další faktor, který mohl mít vliv na přesnost výpočtu jsou drobné odchytky v použitých materiálech. Výpočet je také zatížen určitou chybou metody. I přes tyto nepřesnosti vypovídá průměrná procentuální odchylka mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami o tom, že se podařilo dosáhnout velice přesného výsledku při simulaci teplotního pole elektricky komutovaného motoru.



obr. 6.1 Porovnání naměřených a vypočtených průběhů





## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo, co nejpřesněji namodelovat teplotní pole elektricky komutovaného stroje v prostředí Ansys Workbench. Pro vytvoření geometrie byl použit program Autodesk Inventor profesional 2008. Práce obsahuje postup tvorby geometrie a její následný export do prostředí Ansys Workbench.

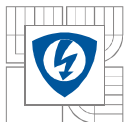
Další podkapitola tohoto projektu se zaměřuje na problematiku meshování. Meshování má podstatný vliv na přesnost výpočtu. Výsledek automatického meshe je značně nepřesný. Z tohoto důvodu proběhla úprava velikosti elementů sítě. Zatímco při automatickém meshi byla celá geometrie rozdělena na 43103 elementů a 110353 nodů, po úpravě meshe dosáhla hodnota počtu elementů 122902 a počet nodů 402214. Došlo tedy zhruba ke čtyřnásobnému zvětšení počtu elementů a nodů. Tím došlo ke zpřesnění výsledku simulace, ale také k prodloužení doby řešení.

Na výpočty v prostředí Ansys Workbench má zásadní vliv také volba a nastavení teplotních vlastností jednotlivých použitých materiálů. Oteplování stroje se zadává pomocí funkce Internal Heat Generation a to ve watttech na metr krychlový. Pomocí této funkce byl jednotlivým částem stroje zadán ztrátový výkon v závislosti na zadáných ztrátových hodnotách. Oteplovací charakteristika získaná výpočtem je zachycena na obr. 4.25. V příloze jsou uvedeny grafické výsledky simulace EC stroje v různých řezech.

Jedním z cílů práce bylo také ověření vypočtených hodnot měření. Měření EC stroje proběhlo při zatížení stroje jmenovitým momentem. Doba měření byla omezena na jednu hodinu. Po jedné hodině bylo měření ukončeno přestože se teplota stroje ještě úplně neustálila. Docházelo však pouze k malým změnám teploty za velké časové úseky. Simulace v prostředí Ansys Workbench je hardwarově a časově značně náročná. Výpočet teplotního pole pro jednu hodinu trval na běžném počítači přibližně 18 hodin. Velikost výsledného souboru v megabajtech přesáhla hodnotu 2500. Tyto skutečnosti vedly také k ukončení měření oteplovací charakteristiky po jedné hodině. Simulace teplotního pole například pro dvě hodiny by vedla k značnému prodloužení doby výpočtu a velikosti výsledného souboru. Příloha této práce je dále doplněna o snímky pořízené pomocí termokamery a o fotografie EC motoru, které byly nafoceny v průběhu měření.

Z porovnání naměřené a vypočtené oteplovací charakteristiky viz obr. 6.1 je jasné patrné, že jsou si obě charakteristiky hodně podobné. Tato skutečnost napovídá tomu, že se podařilo dosáhnout velice přesné simulace. Celková průměrná odchylka mezi oteplovací charakteristikou naměřenou a vypočtenou je 4,04%. Tuto hodnotu lze považovat za úspěšný výsledek. Odchylka mezi naměřenou a vypočtenou oteplovací charakteristikou byla způsobena nejen chybou měření, ale také zjednodušením v použité geometrii. Výsledek výpočtu je dále zatížen chybou metody a také drobnými odlišnostmi v nastavení vlastností použitých materiálů. Nicméně výsledek simulace se podobá naměřeným hodnotám nad očekávání.

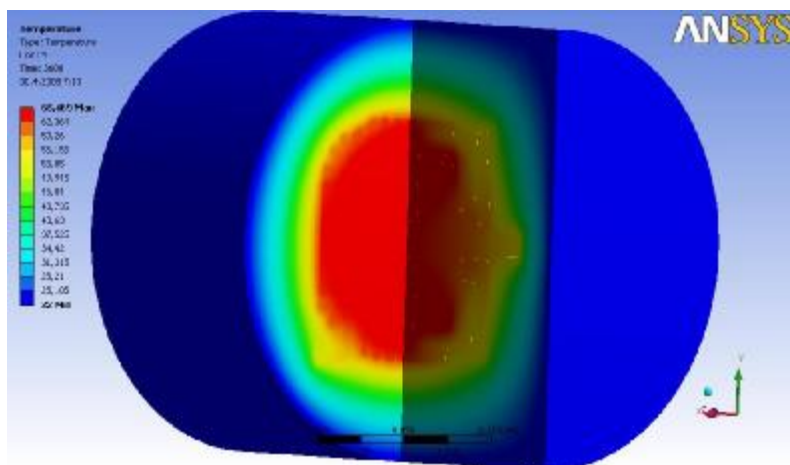
Cíle diplomové práce se podařilo úspěšně splnit.



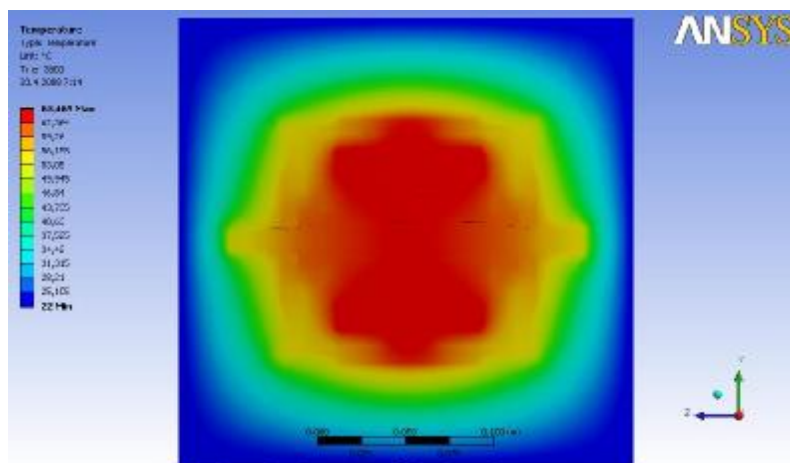
## LITERATURA

- [1] Elektrické servopohony Prof. Ing. Jiří Skalický , CSc.
- [2] Inventor news “Časopis pro moderní konstruktéry” 3/2004
- [3] Malé stejnosměrné motory MAXON 18.7.2002
- [4] ANSYS Mechanical – A Powerful Nonlinear Simulation Tool
- [5] ANSYS Technical Overview
- [6] <http://www.boucnik.cz/>
- [7] Modelování vlastností EC motoru Pavel Kružík

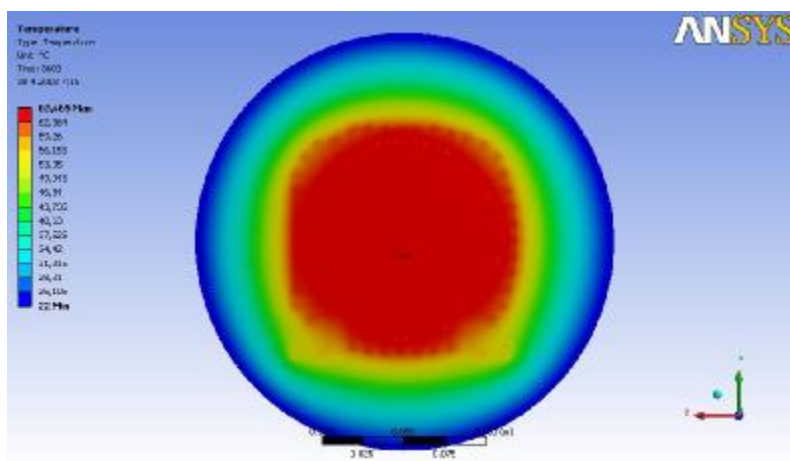
## PŘÍLOHY



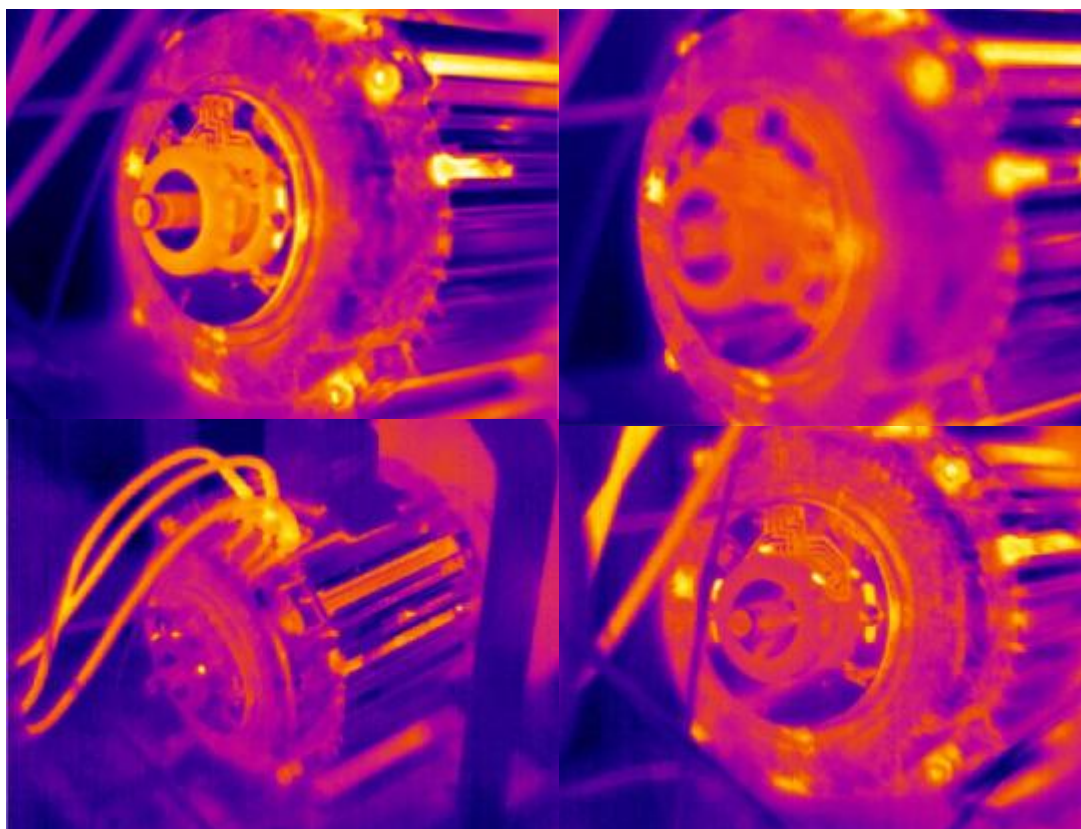
**Příloha 1:** Výsledek simulace s vykrojenou částí motoru a okolním vzduchem



**Příloha 2:** Výsledek simulace s v podélném řezu



**Příloha 3:** Výsledek simulace v příčném řezu



**Příloha 4:** Snímky EC motoru pořízené termokamerou během měření



**Příloha 5:** Fotografie EC motoru pořízené během měření